



*Необходимость, Возможности и Перспективы
Развития Энергонезависимой
Резистивной Памяти:
Глубокое Погружение*

Сергей Ковешников

Развитие Энергонезависимой Резистивной Памяти

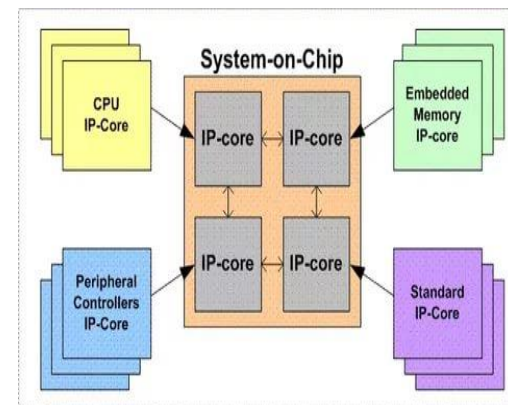
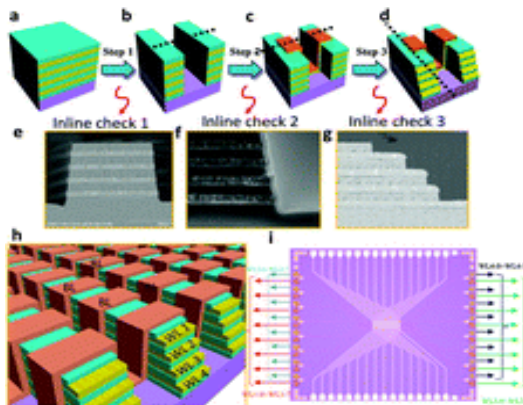
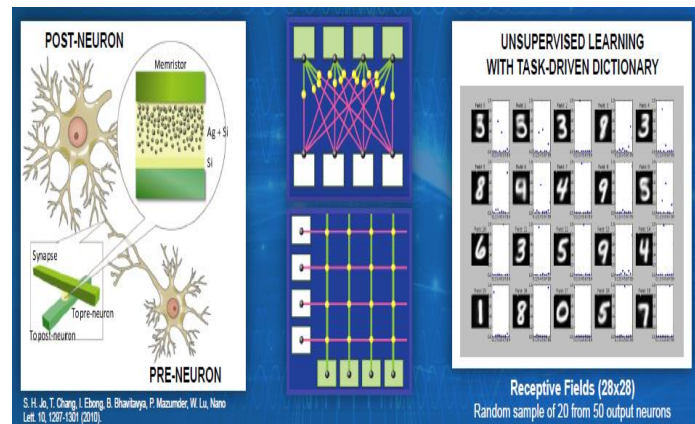
Необходимость:

Матрицы энергонезависимой резистивной памяти нужны для создания:

- элементной базы для нейроморфных устройств
- энергонезависимой памяти терабитного масштаба
- энергоэкономных однокристальных систем (SOC) и компьютеров нового поколения

Для их создания необходимо разработать элементы резистивной памяти

- с высокой плотностью записи данных за счет уменьшения площади ячеек памяти и достижения многоуровневых состояний
- высокой надежностью и воспроизводимостью результатов переключения
- высокой скоростью и большим количеством циклов переключения
- низкой потребляемой мощностью



Развитие Энергонезависимой Резистивной Памяти

Возможности: Анализ ситуации

- *Наивысший интерес ведущих компаний (Intel, Samsung, Hynix, Toshiba, HP, Micron Technologies) к разработке резистивной памяти для создания энергоэффективных однокристальных систем (System-on-Chip) был в 2008-2013 годах.*
- *В 2013 году Intel и другие компании утратили интерес из-за проблем, связанных с:*
 - *высокими значениями пороговых напряжений переключения и*
 - *низкой воспроизводимостью результатов переключения от цикла к циклу.*
- *Интерес к резистивной памяти вновь заметно вырос в 2017-2018 годах. Связано это с тем, что многоуровневая память может использоваться для создания нейроморфных сетей.*

У России еще есть шанс не оказаться в аутсайдерах в мировой гонке:

- *Технология изготовления резистивной памяти относительно простая*
- *При разумном финансировании и поддержке ведущих ученых может быть осуществлен прорыв, способный вывести Россию на конкурентно-способный уровень*
- *Более того, накопленный нами опыт, понимание проблематики, владение технологическими и экспериментальными ресурсами дают нам дополнительные преимущества перед нашими конкурентами*

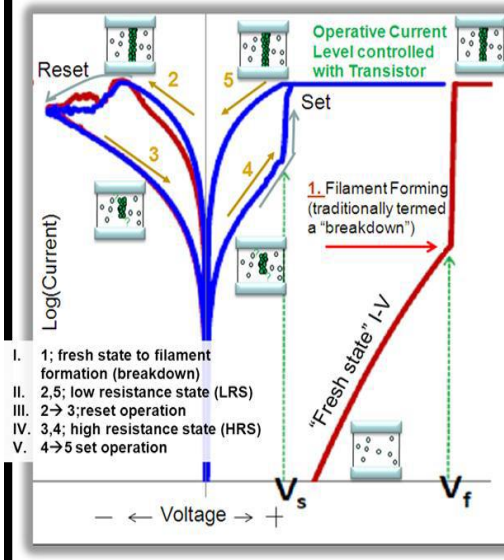
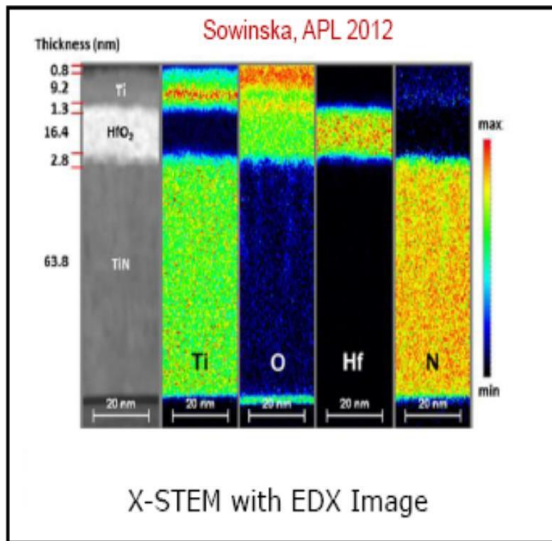
Развитие Энергонезависимой Резистивной Памяти

***Возможности:** Наше участие в гонке все еще возможно благодаря ряду нерешенных фундаментальных научно-технических проблем.*

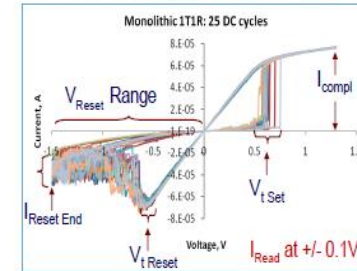
Основные из них:

- 1. Необходимость понимания механизма переключения*
- 2. Необходимость улучшения воспроизводимости характеристик переключения*
- 3. Необходимость создания филамента (формовки) для матриц большой плотности*
- 4. Необходимость создания селектора для устранения паразитных токов*
- 5. Необходимость оптимизации (уменьшения) управляющего напряжения для однокристалльных систем*

Резистивная память на основе оксидов металлов



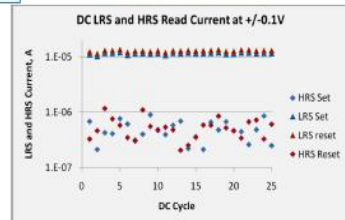
DC Switching: Intrinsic Variability



Approach:

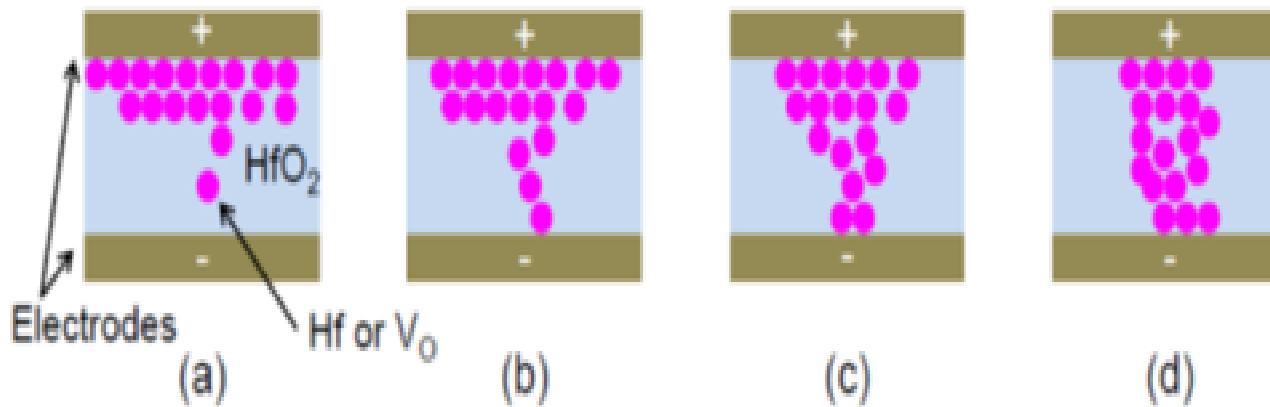
- Run multiple DC Cycles (25-100 cycles)
- Determine Mean and St Dev
- Use **same device** to repeat DC cycles at
 - different I_{compl}
 - different V_{Reset} Range

HRS and LRS Currents



Key Learning:

- HRS Current – highest variability
- Sigma/Mean ratio > 30%



Рост диаметра проводящего филамента:

$$d\Phi = A * \exp(-E(V)) dt kT(V)$$

Энергетический барьер:

$$E(V) = E_0 - \alpha qV$$

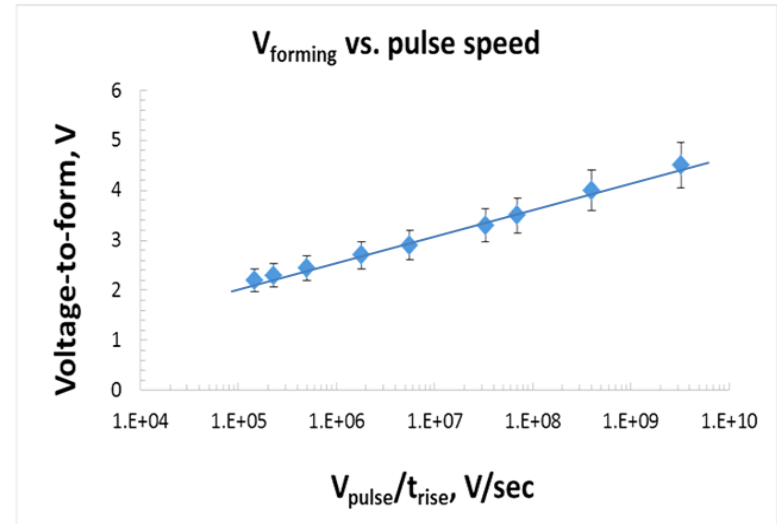
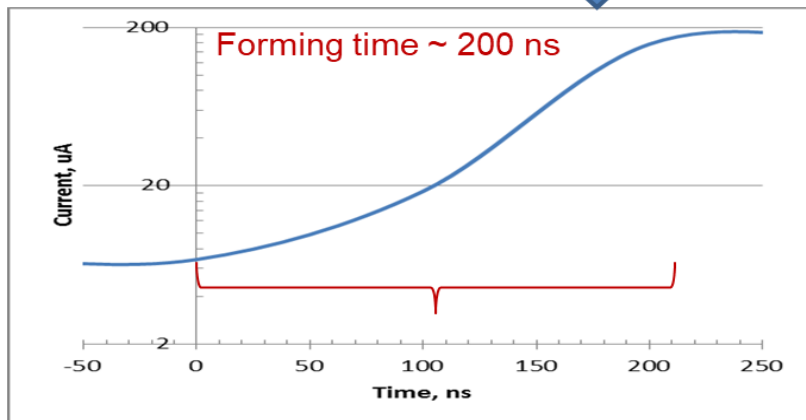
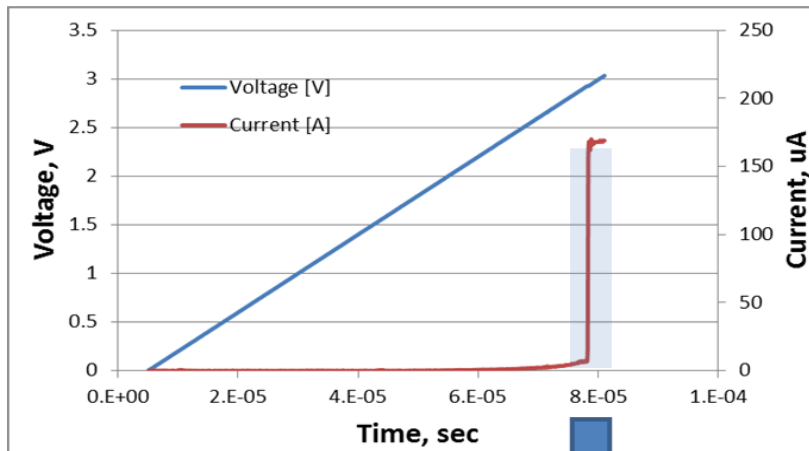
Джоулевский нагрев: $T(V) = T + \gamma V^2$

k – постоянная Больцмана

q – элементарный заряд

$A, \alpha, \gamma, E_0, T_0$ – константы

Pulsed Forming: V_F – Pulse speed trade-off



Forming Voltage *increases* with Increasing pulse speed, V_{pulse}/t_{rise}

Pulsed Set/Reset: PW-PH Tradeoff (D. Ielmini)

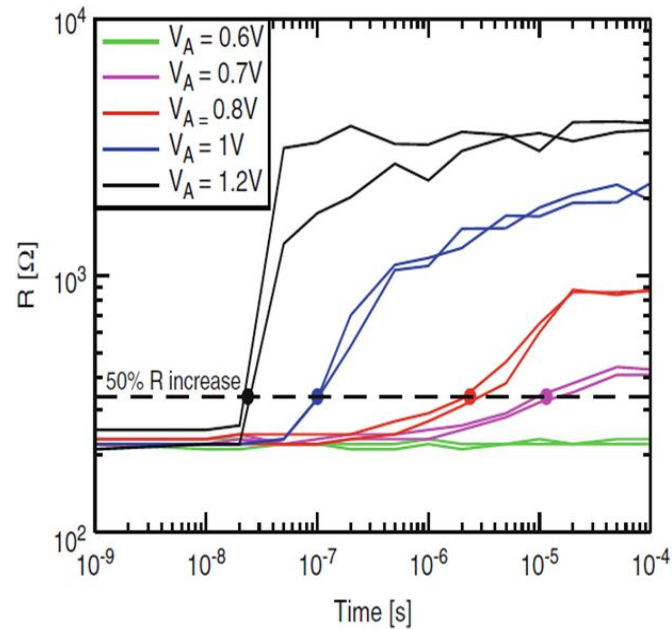


Fig. 6.8 Measured R as a function of time during reset for increasing V_A . No load resistance was applied in series with the cell. The reset time, corresponding to a 50% increase of R , is marked on the figure, indicating an almost exponential decrease of t_{reset} for increasing voltage

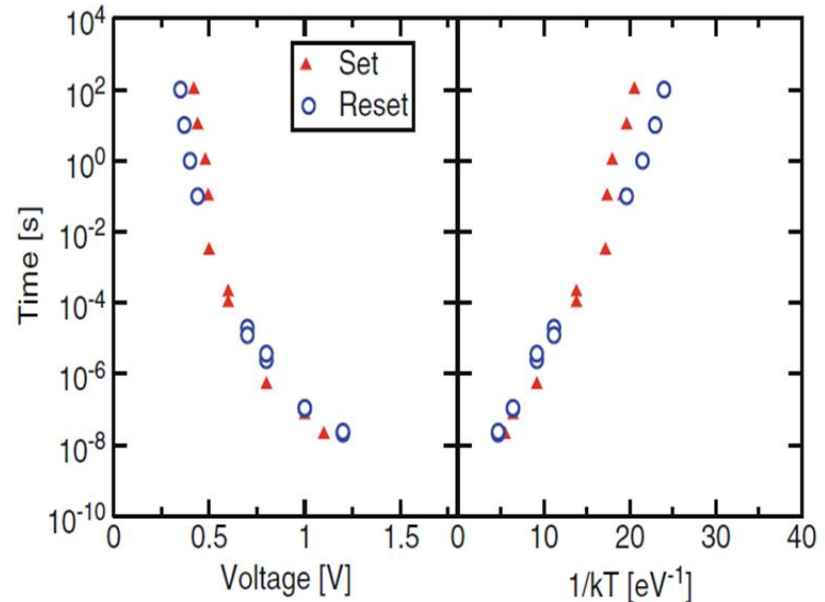


Fig. 6.9 Measured set and reset times, evaluated as a 50% resistance decrease or increase, respectively, as a function of voltage (a) and as a function of $1/kT$ (b), where T is the local temperature at the CF evaluated from the Joule heating formula of Eq. (6.4). The exponential dependence on $1/kT$ suggests that set/reset processes are due to temperature-activated mechanisms obeying an Arrhenius law

6/19/2019

19

Sergei Koveshnikov MEM-Q 2018

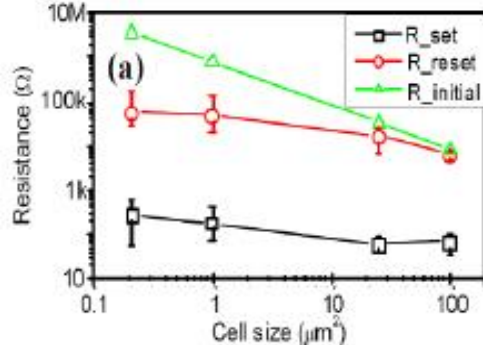
Резистивная память на основе оксидов металлов

How do we know it's a Conductive Filament?

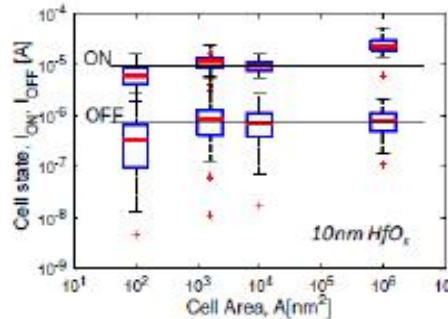


- No area scaling of ON resistance

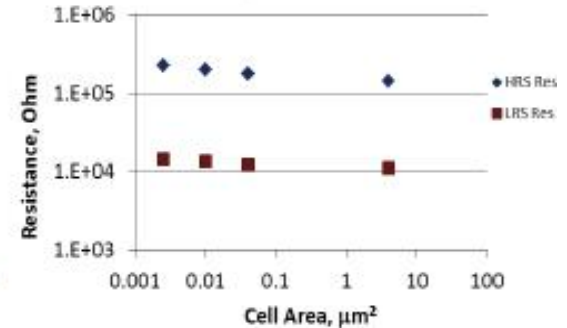
Baek, IEDM 2004



IMEC, IEDM 2011

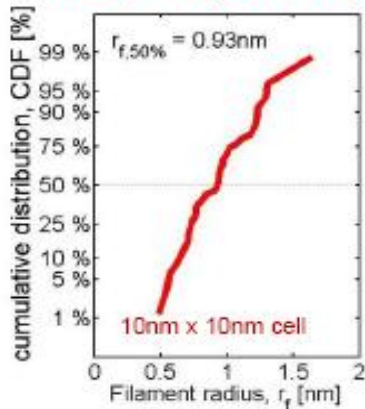


Sematech, 2012



- CF size is 1 – 5 nm in diameter

IMEC, 2012 (calculated)



Bersuiker 2011

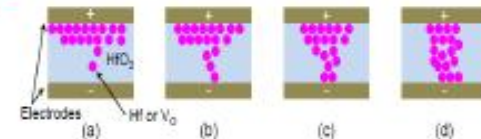
RRAM operations: From grain boundaries to conductive filament



Model-based simulations need to reproduce the entire forming-switching phenomenon

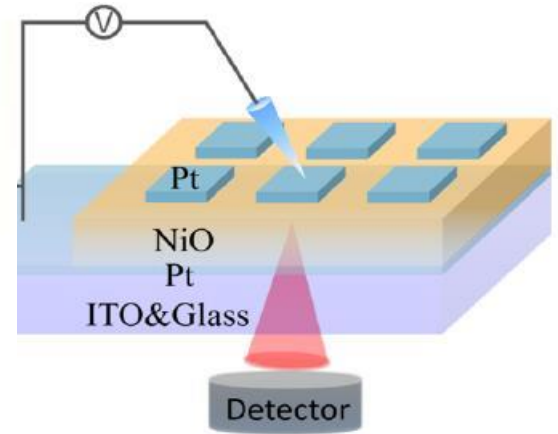
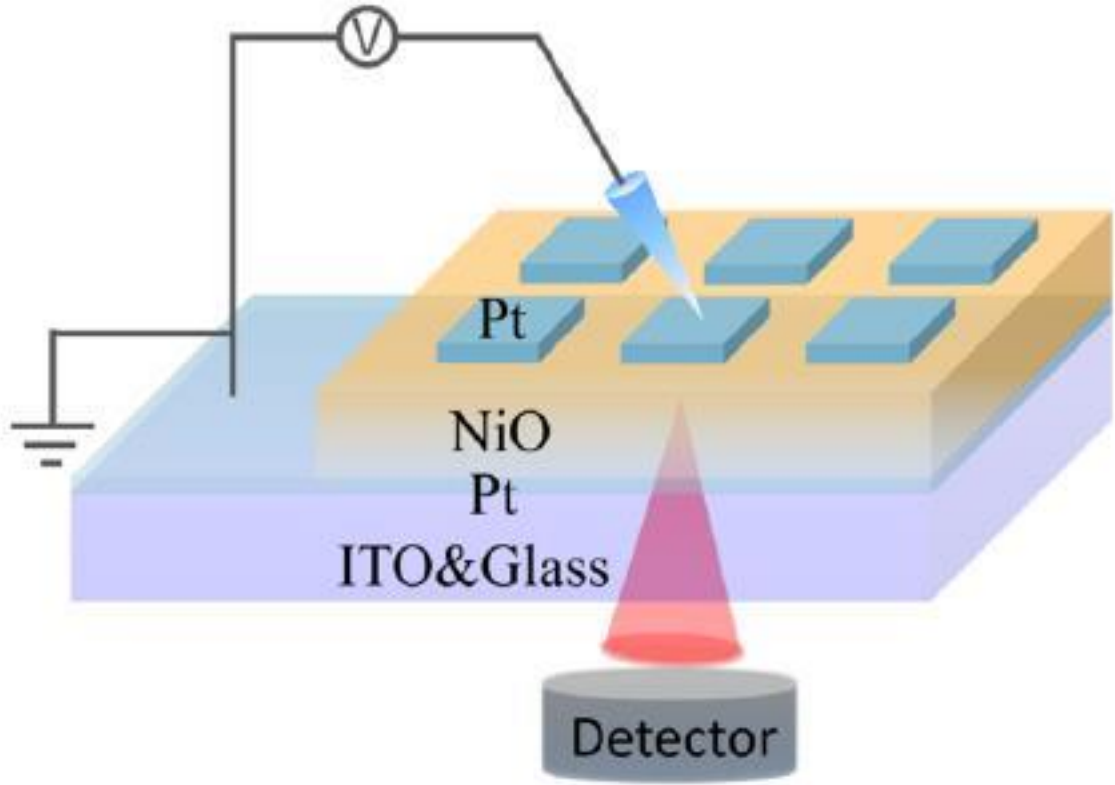
Ielmini, 2011

Analytical set/reset model

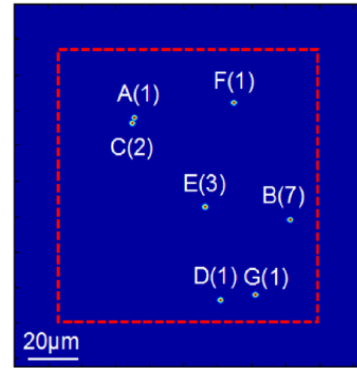
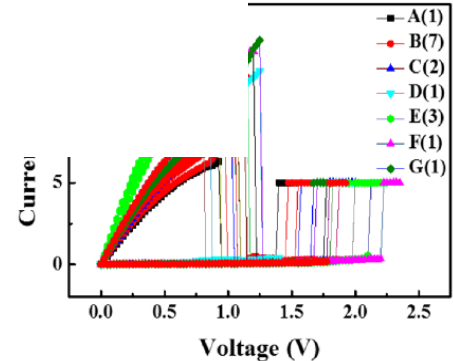


- Growth of CF diameter ϕ : $\frac{d\phi}{dt} = A\phi \frac{-E_x(z)}{V(r)}$
 - Energy barrier: $E_x(V) = E_{x0} - \alpha qV$
 - Joule heating: $T(V) = T_0 + \frac{R_B}{R} V^2 = T_0 + \gamma V^2$
- V-driven CF growth: $\frac{d\phi}{dt} = A\phi \frac{-E_x - \beta V^2}{V(r)}$

ольких филаментов



X-STEM with EDX Image



Средняя высота шероховатости поверхности электрода порядка 3 нм. Для тонких пленок сильное локально неоднородное электрическое поле приложения внешнего напряжения.

Изменение положения проводящего филамента от цикла к циклу, приводящее к невоспроизводимости параметров переключения. Lin, APL

2018

Сергей Ковешников

Развитие Энергонезависимой Резистивной Памяти

Перспективы: В чем наше преимущество и что делать?

Научно-технический прорыв невозможен без глубокого понимания механизмов переключения и разработки принципиально новых элементов резистивной памяти:

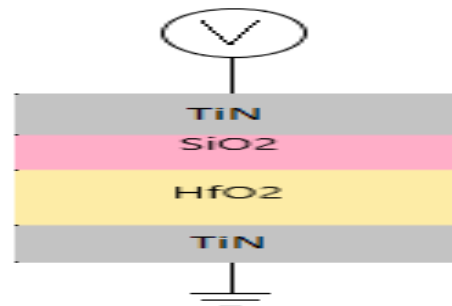
I. Наш подход основан на контролируемом создании проводящего филамента. Нами разработаны методики, являющиеся интеллектуальной собственностью ИПТМ РАН:

1. Один из разработанных и апробированных методов заключается в локальном введении структурных дефектов в оксид металла
2. Другой метод основан на увеличении электрического поля в центре ячейки памяти помощью специально введенных зарядов в диэлектрик, окружающий цилиндрическую ячейку памяти.
3. Третий метод основан на локальном создании механических напряжений в тонком слое диэлектрика с помощью нано-индентора
4. Четвертый метод основан на управлении стехиометричностью диэлектрика и создании двух филаментов

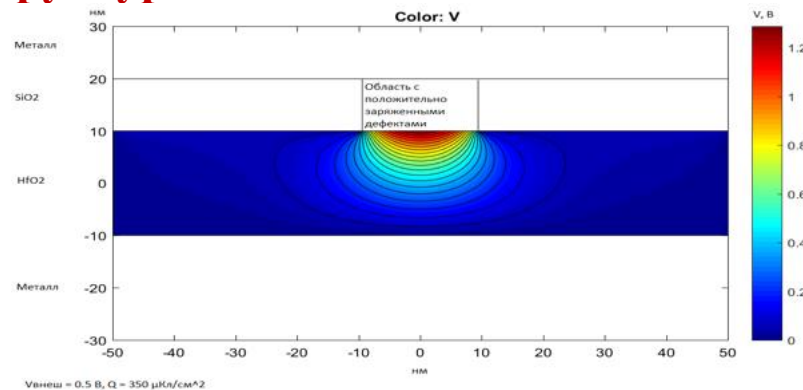
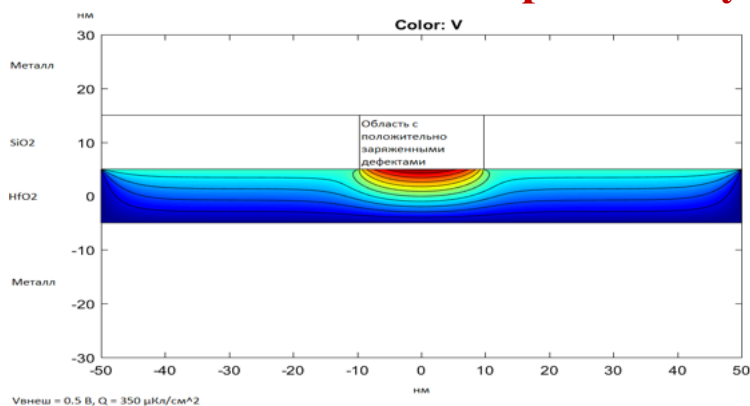
II. Нами разработана и апробирована концепция энергонезависимого многоуровневого мемристора на базе беспереходного транзистора с зарядом в широкозонном подзатворном диэлектрике

Контролируемое создание единственного, строго позиционированного проводящего филамента

Элементы резистивной памяти нового поколения, разработанные в ИПТМ РАН совместно со студентами МФТИ (М. Федотов – Моделирование)



1. Локальное введение заряда в двуслойной структуре



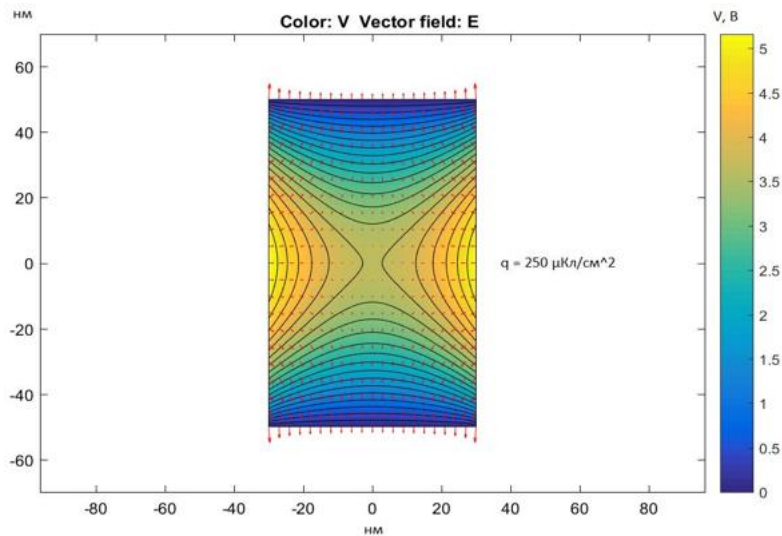
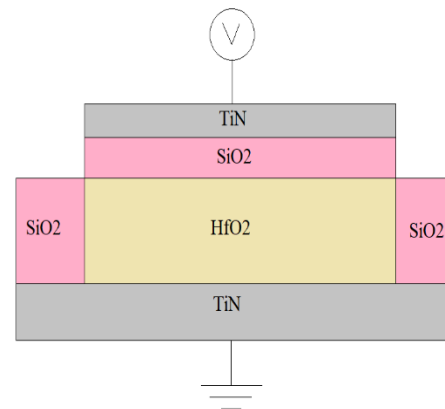
Толщина HfO ₂	10 нм
Внешнее напряжение	0.5 В
Размер области введения заряда	20 нм
Величина вносимого заряда	350 мкКл/см ²
Общие размеры ячейки	100x60 нм

Толщина HfO ₂	20 нм
Внешнее напряжение	0.5 В
Размер области введения заряда	20 нм
Величина вносимого заряда	350 мкКл/см ²
Общие размеры ячейки	100x60 нм

Контролируемое создание единственного, строго позиционированного проводящего филамента

Элементы резистивной памяти нового поколения, разработанные в ИПТМ РАН совместно со студентами МФТИ (М. Федотов – Моделирование)

Локальное введение заряда в ячейку, помещенную в диэлектрическую среду

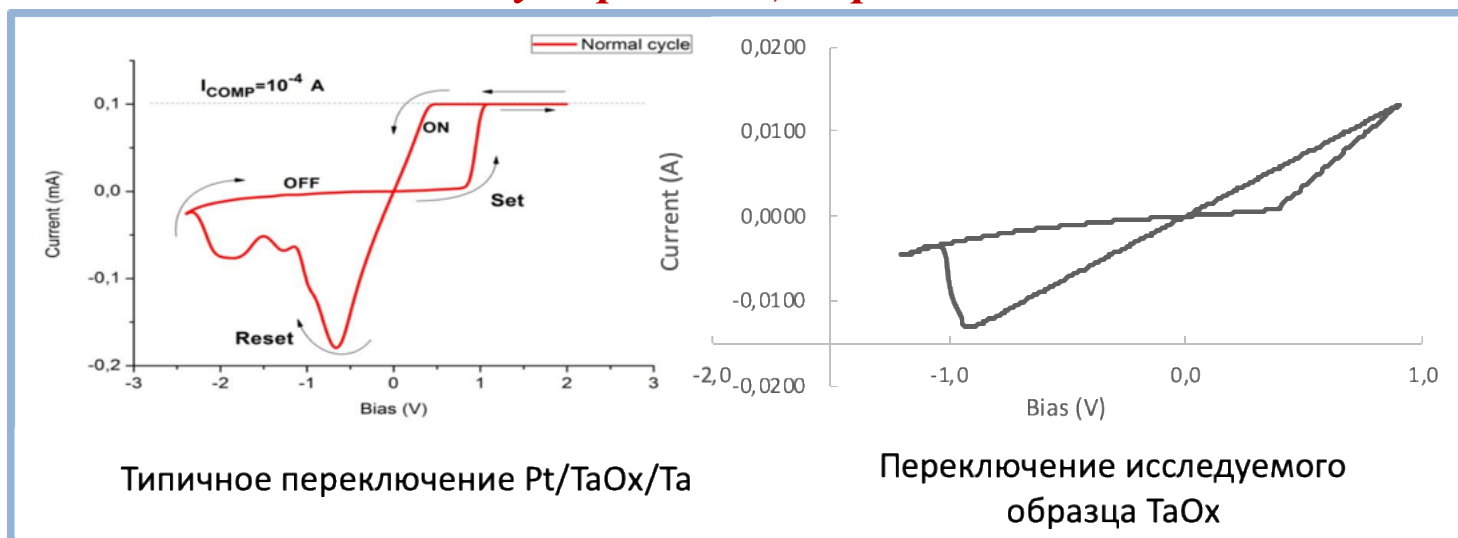


Толщина HfO ₂	100 нм
Внешнее напряжение	0В
Размер области введения заряда	100 нм по бокам
Величина вносимого заряда	250 мкКл/см ²
Общие размеры ячейки	60x100 нм

Контролируемое создание единственного, строго позиционированного проводящего филамента

Элементы многоуровневой резистивной памяти
на основе TaOx - совместно МФТИ
(М. Федотов, М. Жуков, А. Зенкевич)

Создание двух проводящих филаментов

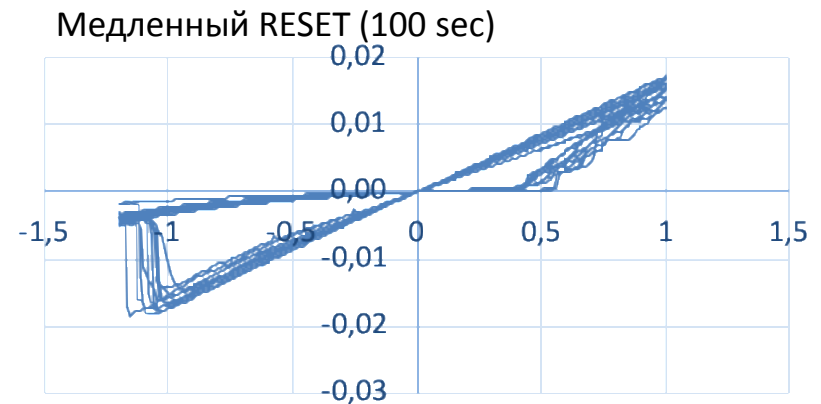
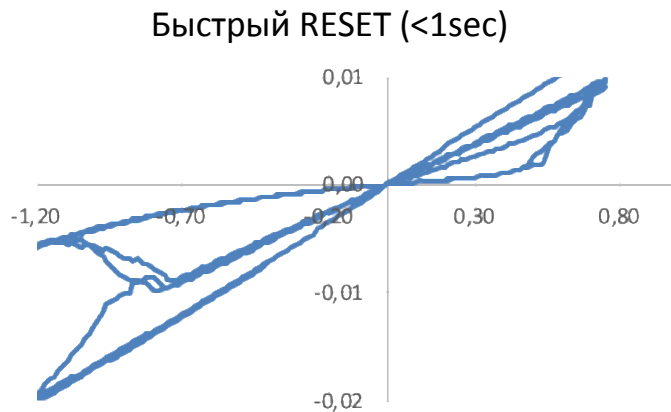


Получена линейная зависимость роста тока от напряжения SETa.

Контролируемое создание единственного, строго позиционированного проводящего филамента

Элементы многоуровневой резистивной памяти на основе TaOx - совместно МФТИ
(М. Федотов, М. Жуков, А. Зенкевич)

Создание двух проводящих филаментов: улучшение воспроизводимости от цикла к циклу

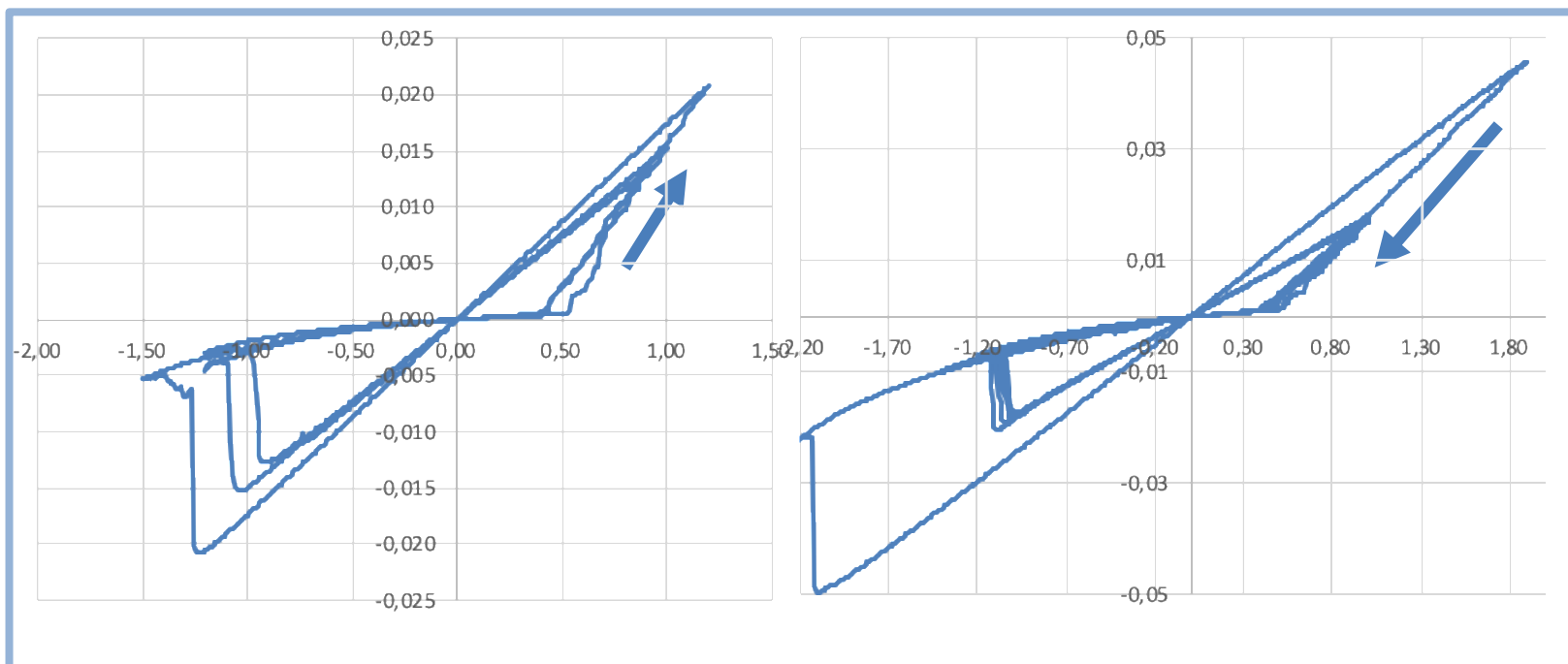


	Быстрый RESET	Медленный RESET
Средняя величина	1,26875	1,064285714
Дисперсия	0,185078333	0,001765714
Среднее отклонение	0,353125	0,036870748
Среднеквадр. отклонение	0,430207314	0,042020403

Контролируемое создание единственного, строго позиционированного проводящего филамента

Элементы многоуровневой резистивной памяти на основе TaOx - совместно МФТИ
(М. Федотов, М. Жуков, А. Зенкевич)

Создание двух проводящих филаментов – многоуровневое переключение

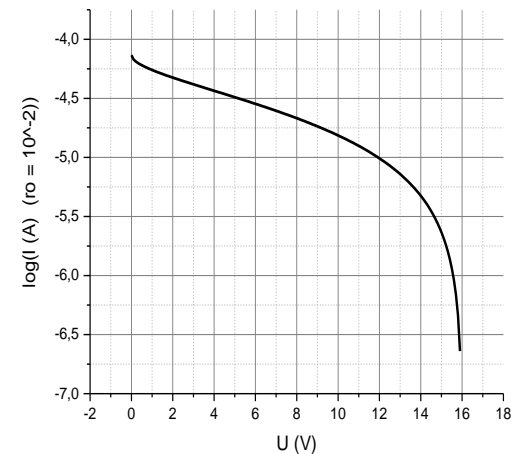
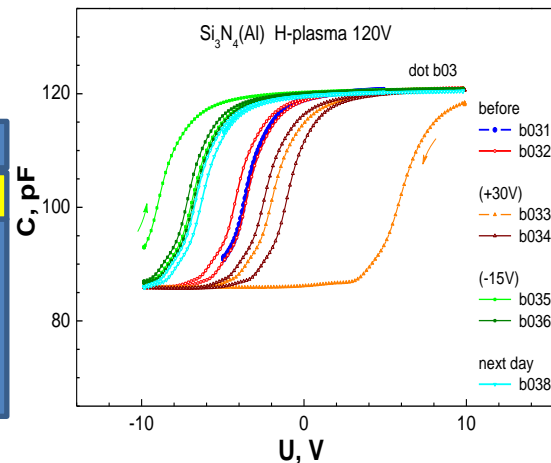
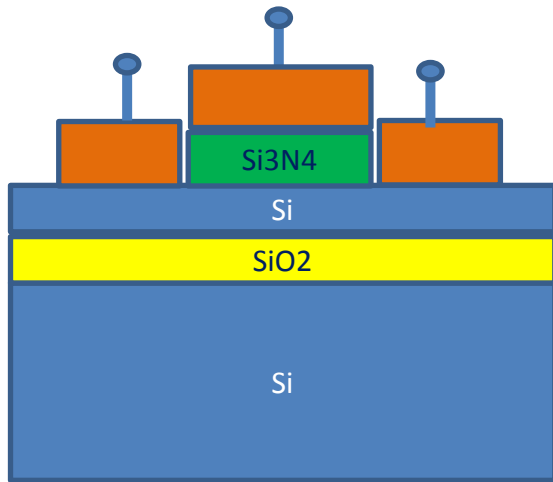


Переход между уровнями наблюдается в обе стороны в диапазоне от 0,8 В до 1,9 В. При увеличении/уменьшении напряжения SET - зеркально (<5%) увеличивается/уменьшается напряжение RESET.

Развитие Энергонезависимой Резистивной Памяти

Перспективы: концепция энергонезависимого многоуровневого мемристора на базе беспереходного транзистора с зарядом в широкозонном подзатворном диэлектрике

Элементы резистивной памяти нового поколения, разработанные в ИПТМ РАН совместно со студентами МФТИ (А. Солодун)



- > By varying the gate voltage we have obtain very large charge window in Si_3N_4 (from negative $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ to positive $4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$)
- > The trapped charge can control channel conductance of the junctionless transistor
- > **The prototype of multi-level resistive NVM device is demonstrated (patent application is pending)**

Развитие Энергонезависимой Резистивной Памяти

Глубокое Погружение – взгляд в будущее: Исследование механизмов переключения в элементах резистивной памяти на основе оксидов металлов – Проект РФФИ

- Прецизионное позиционирование проводящего филамента в сочетании с возможностями электронно-лучевой литографии и изготовления тонких структур для просвечивающей электронной микроскопии позволят выявлять его расположение в ячейке памяти и изучать его электрические свойства, структурные изменения и химический состав в процессе резистивного переключения.

-Локальная визуализация проводящего филамента и его свойства в процессе переключения будут также изучены методами атомно-силовой микроскопии, электролюминесценции и растровой электронной микроскопии в режиме наведенного тока.

- Для определения роли дефектов в диэлектрике в процессах образования филамента и последующего переключения будут проведены экспериментальные исследования спектров глубоких уровней в ячейке памяти в 4-х возможных состояниях (исходном, после формовки, после переключения из высокоомного в низкоомное состояние и обратно). Эти уникальные исследования будут проводиться с помощью оптимизированных нами методов термостимулированного тока и релаксационной спектроскопии глубоких уровней.

Развитие Энергонезависимой Резистивной Памяти

Выводы:

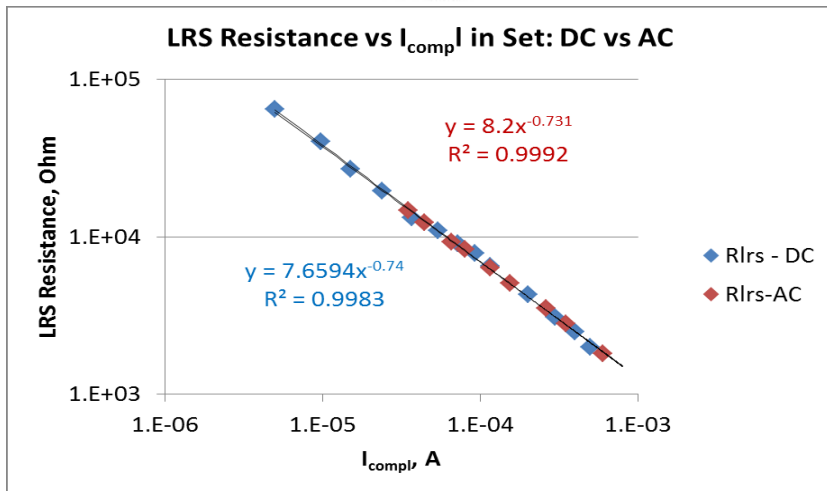
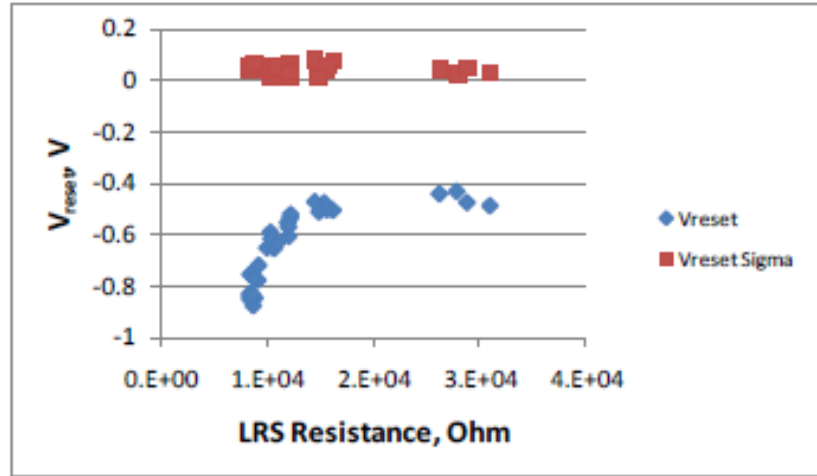
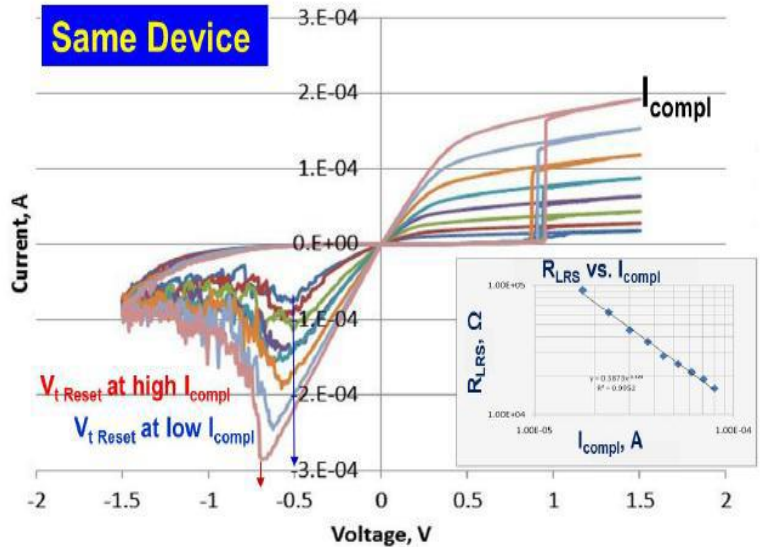
1. *Технология изготовления резистивной памяти относительно простая*
2. *Прорыв в развитии резистивной памяти будет основан на решении фундаментальных научных задач*
3. *Накопленный нами опыт, понимание проблематики, владение технологическими и экспериментальными ресурсами позволят нам эти задачи решить*
4. *При адекватном финансировании и поддержке ведущих ученых, тесном сотрудничестве Академии Наук с электронной промышленностью может быть осуществлен прорыв, способный вывести Россию на конкурентно-способный уровень*

Спасибо



$I_{compl} - R_{LRS} - V_{reset}$ Trade off

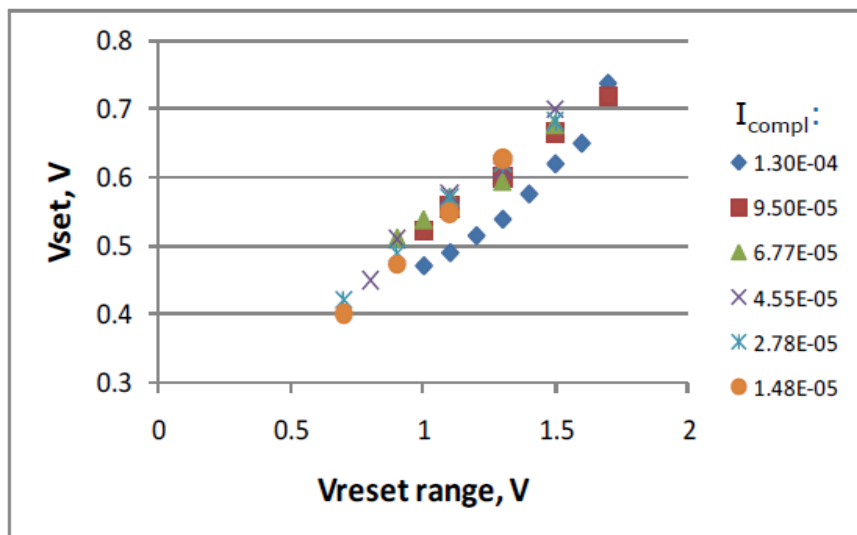
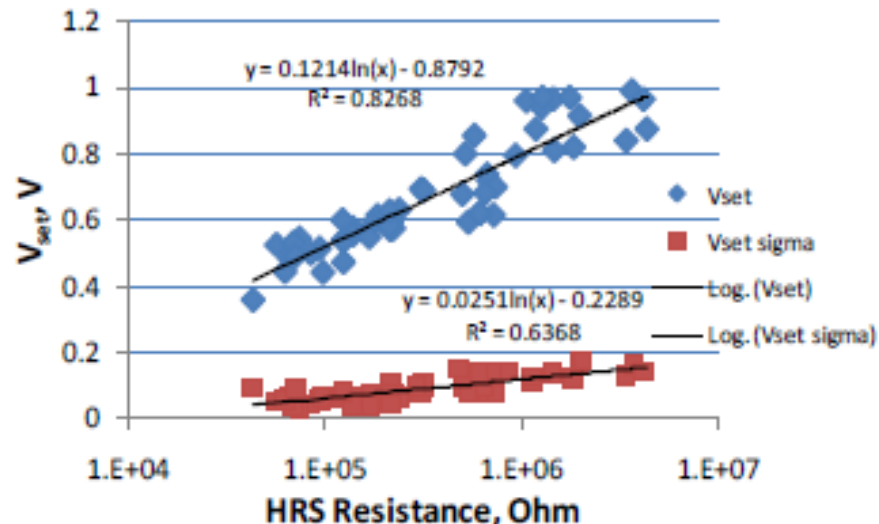
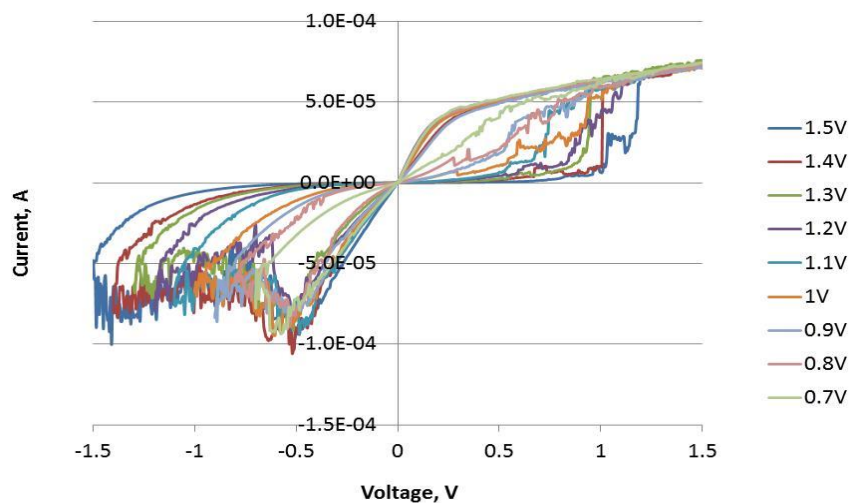
Tuning up R_{LRS} and V_{reset} by I_{compl}



- R_{LRS} decreases with I_{compl}
 - Same trend in DC and AC
- $V_{t\ Reset}$ increases by $\sim 0.5\ V$ with decreasing R_{LRS} from $30\ k\Omega$ to $7\ k\Omega$
- $V_{t\ Reset}$ variability is negligible in R_{LRS} range

Reset Voltage Range – R_{HRS} – V_{set} Trade off

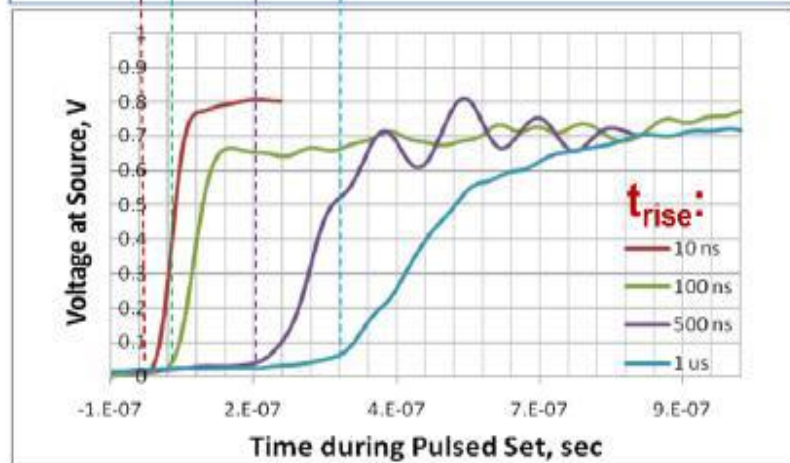
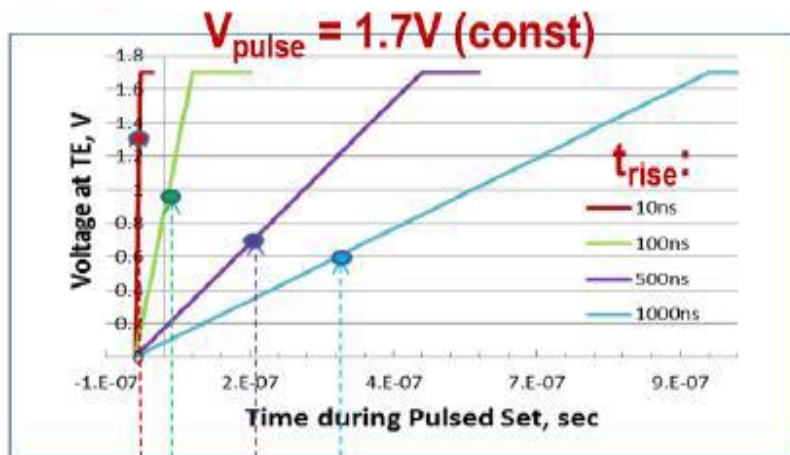
Tuning up R_{HRS} and V_{set} by Voltage in Reset



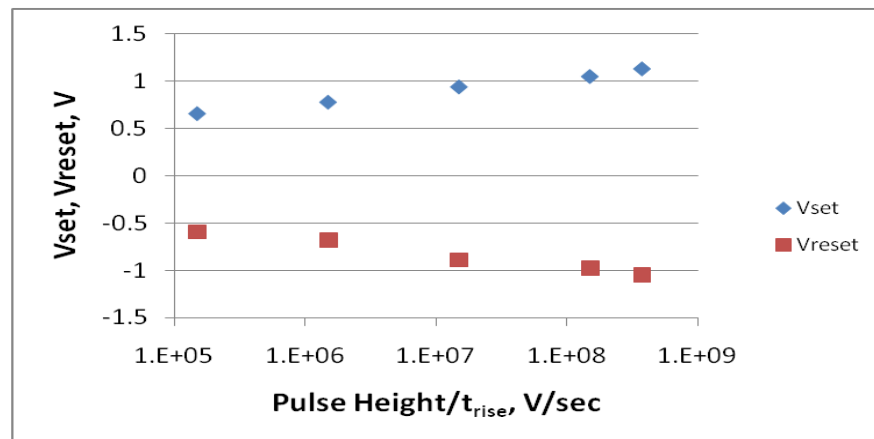
- V_{tSet} is decreased by ~ 0.6 V with decreasing R_{HRS} from $5\text{ M}\Omega$ to $30\text{ k}\Omega$
- V_{tSet} variability increases with R_{HRS}

Pulsed Set: $V_{set} - t_s$ - Pulse speed trade-off

$V_{set} - t_{rise}$ trade-off



$V_{set/reset} - t_{rise}$ trade-off

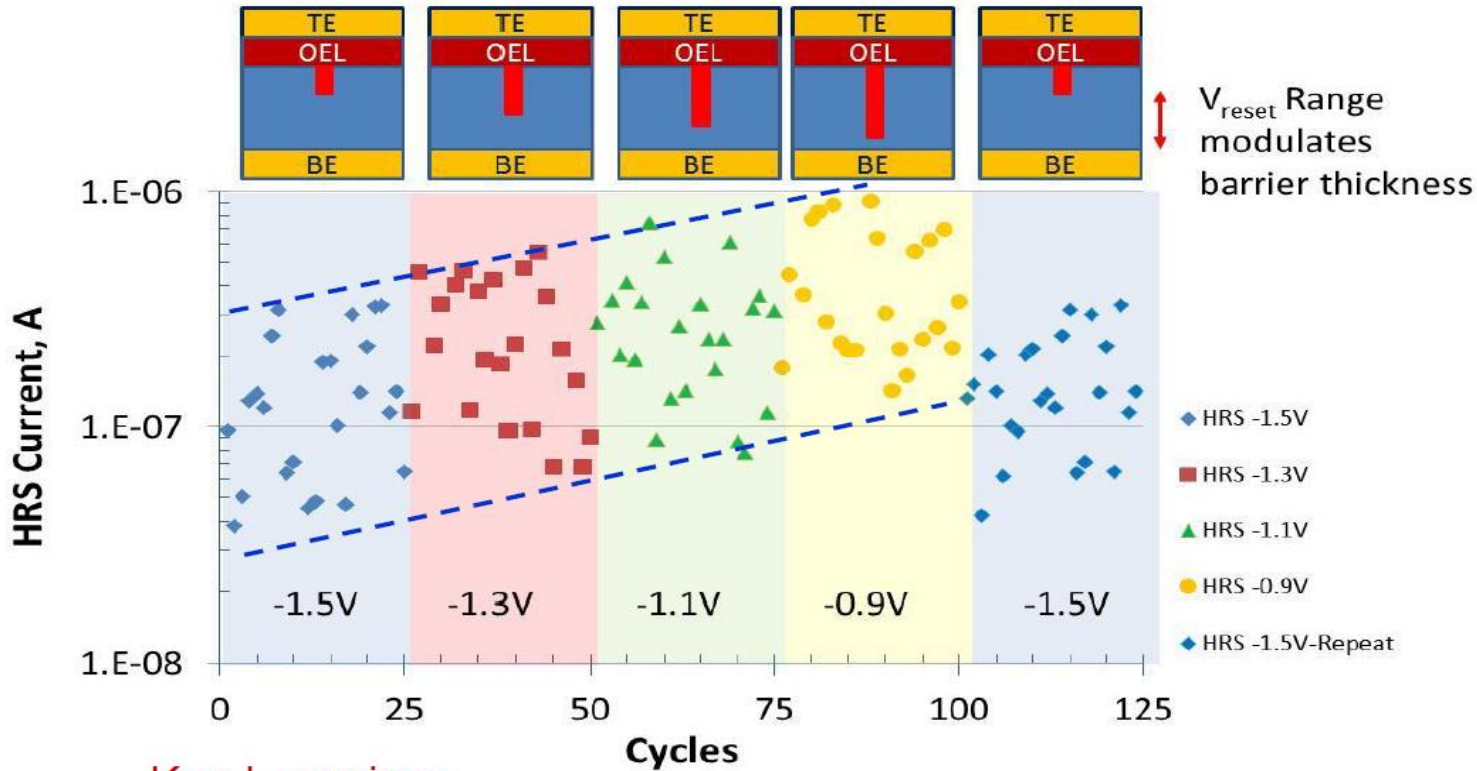


- Set Voltage *increases* with increasing pulse speed, V_{pulse}/t_{rise}
- Reset Voltage *increases* with increasing pulse speed

R_{HRS} Reversible Tunability by Voltage in Reset

HRS Current vs. V_{reset} Range

Set CC = $25\mu A$ – Const (CC in Forming = $20\mu A$)

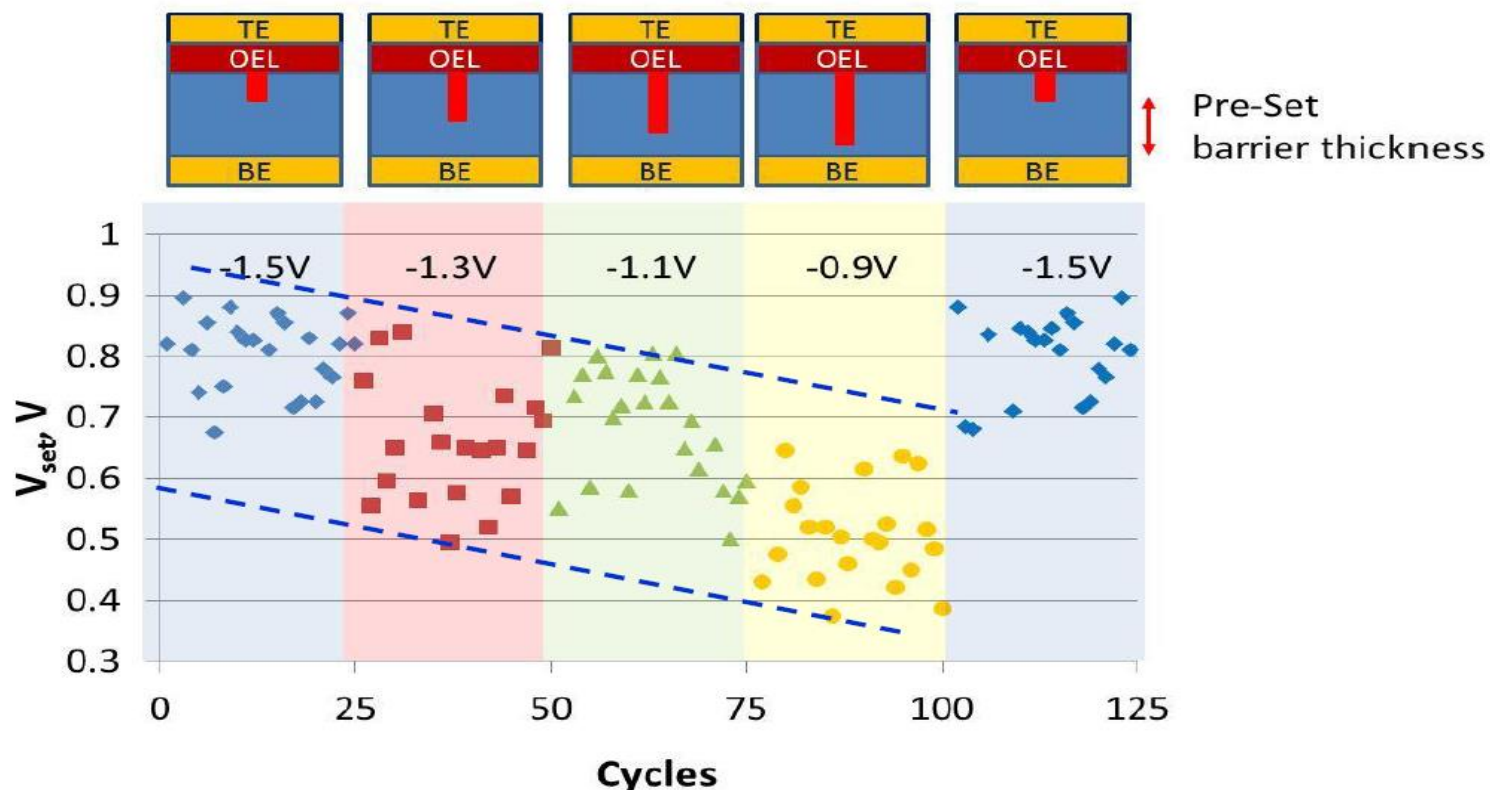


Key Learning:

- HRS current decreases with V_{reset} Range
- Barrier thickness modulation is fully reversible
- We modulate the barrier thickness rather than CF size

V_{set} Reversible Tunability by Voltage in Reset

V_{set} vs. V_{reset} Range
Set CC = Const



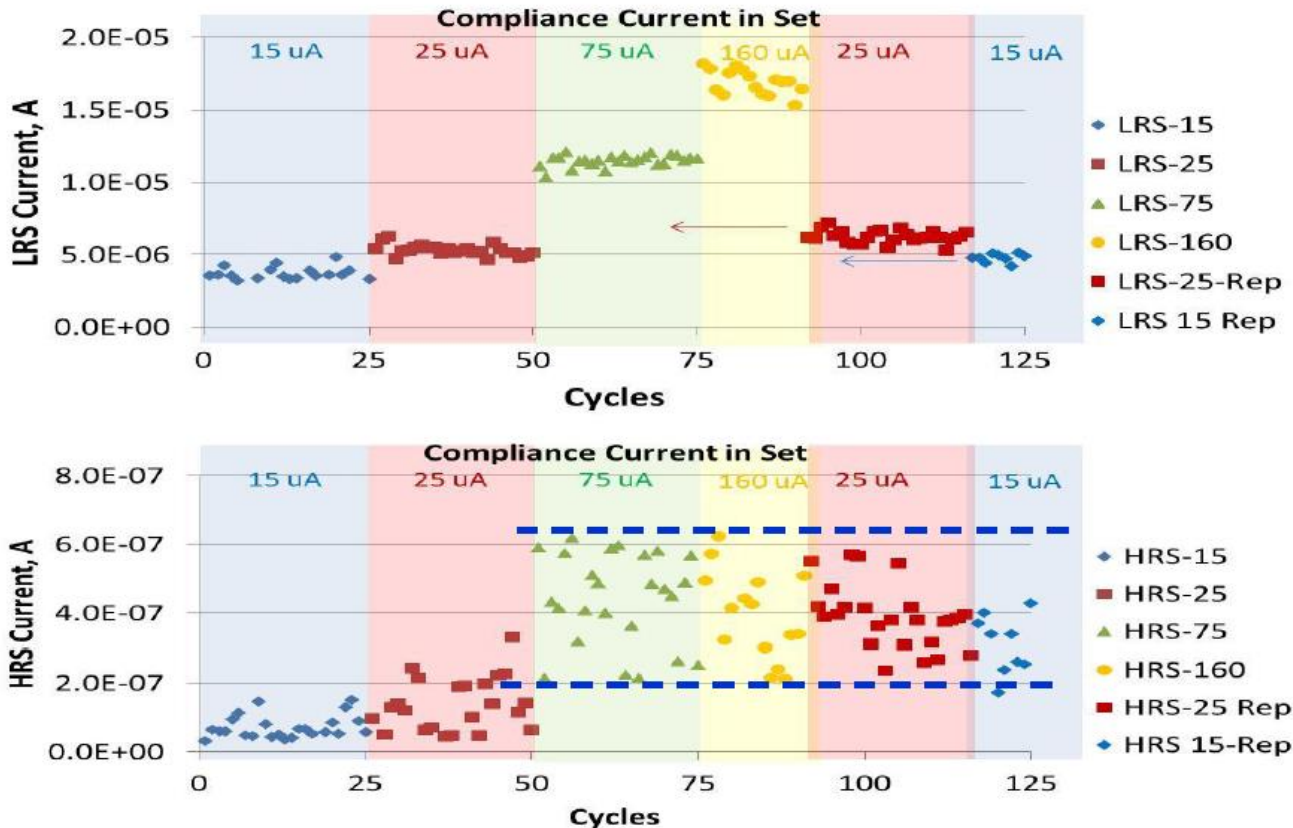
Key Learning:

- V_{set} increases with V_{reset} Range – Fully reversible
- Thicker Barrier requires higher V_{set}

I_{HRS} and I_{LRS} Tunability by Compliance Current

LRS and HRS Currents vs. CC in Set

V_{reset} Range = Const (Forming at $CC=20\mu A$)



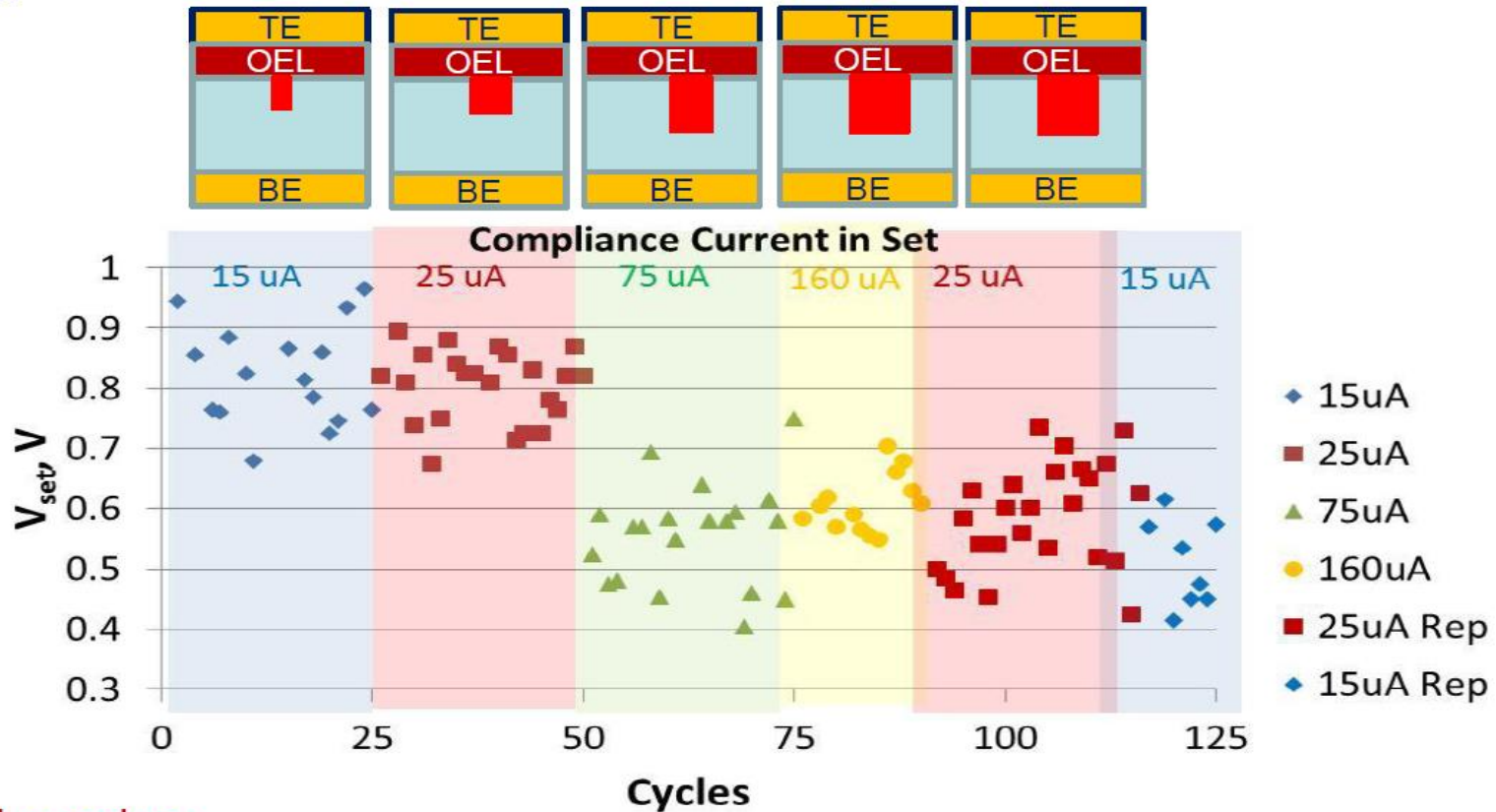
Key Learning:

- LRS current increases with CC – the change is NOT reversible
- HRS current increases with CC – the change is NOT reversible

V_{set} Tunability by Compliance Current

V_{set} vs. CC in Set

V_{reset} Range = Const (Forming at CC = 20 μ A)



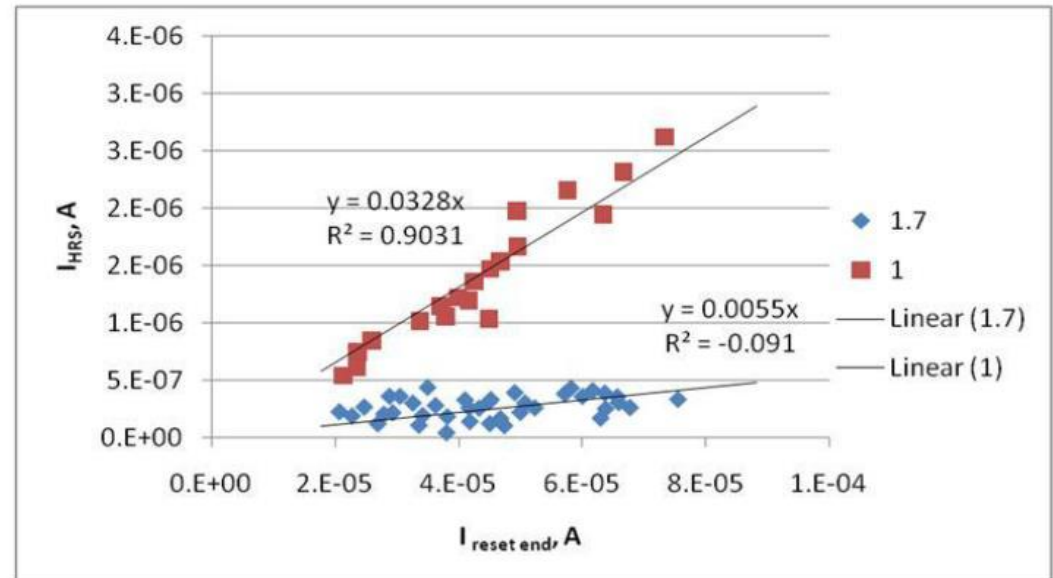
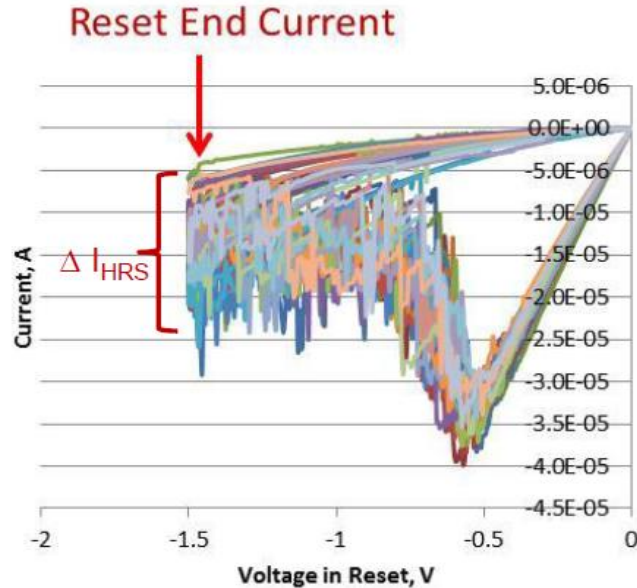
Key Learning:

- V_{set} decreases by ~ 0.2 V with CC – the change is NOT reversible
- HRS current increases with CC – the change is NOT reversible
- Increasing CC results in enlargement of Conductive Filament !

I_{HRS} Cycle-to-Cycle Variability

HRS Current vs. *Reset End Current (at V_{reset} Range)*

Set CC = Const



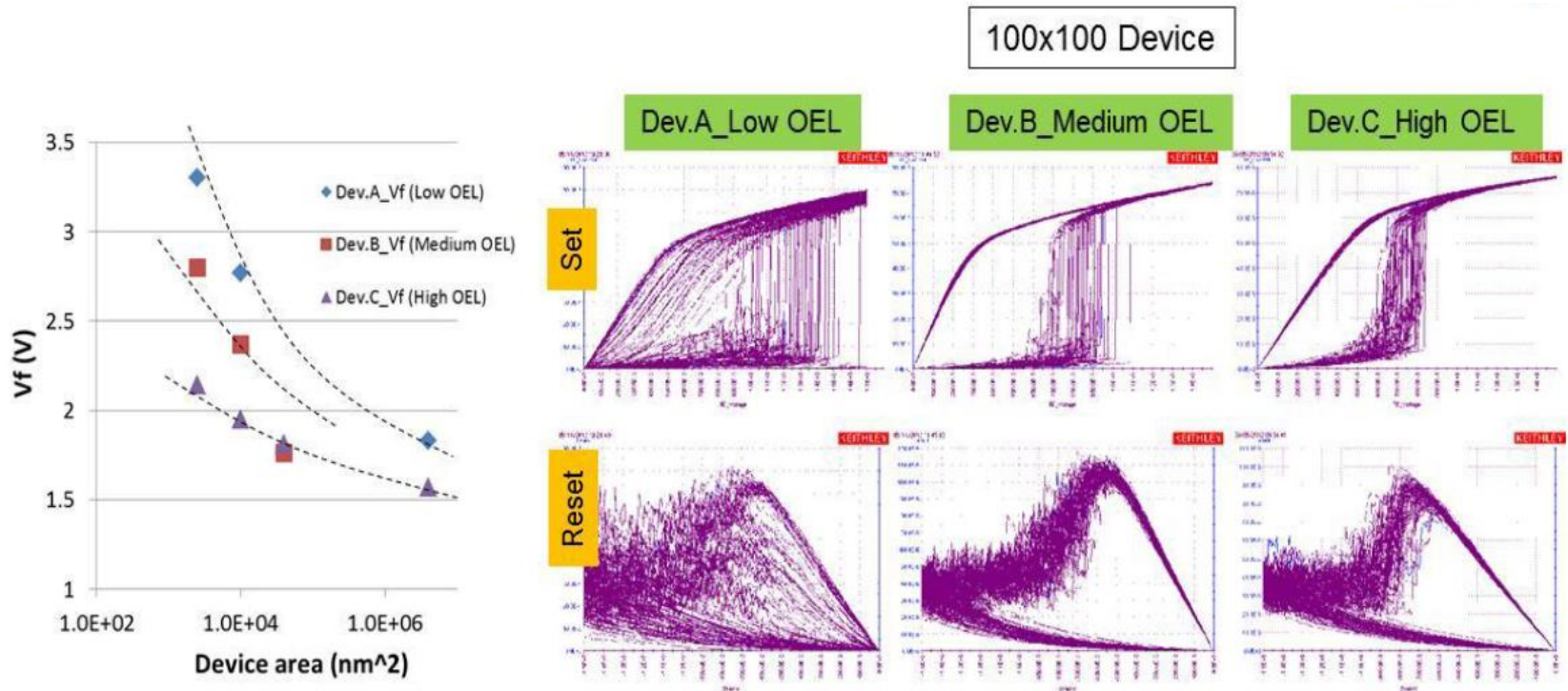
Key Learning:

- Reset End Current fluctuates randomly from cycle to cycle
- The higher the Reset End Current, the higher the HRS current

Needs for RRAM optimization for Variability

Improvement: **Effect of OEL Thickness**

V_f and switching characteristics vs. OEL thickness
Set CC = 75uA



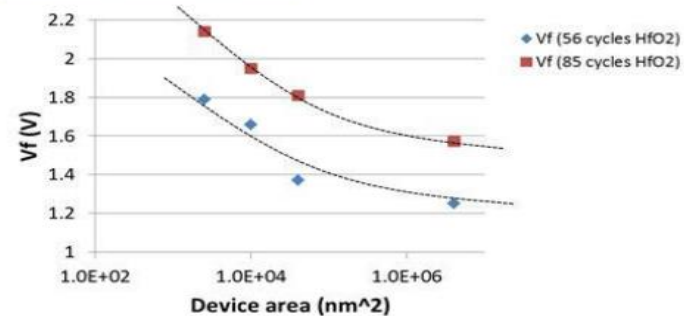
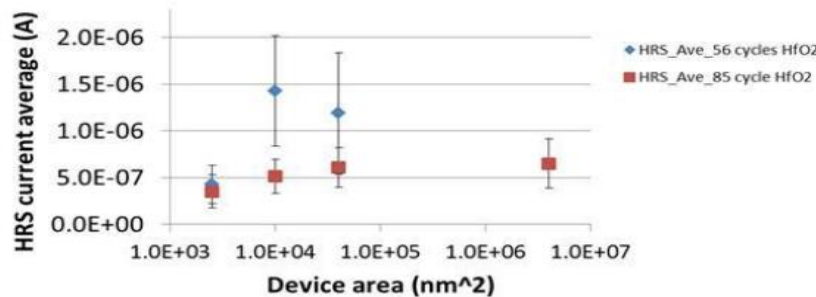
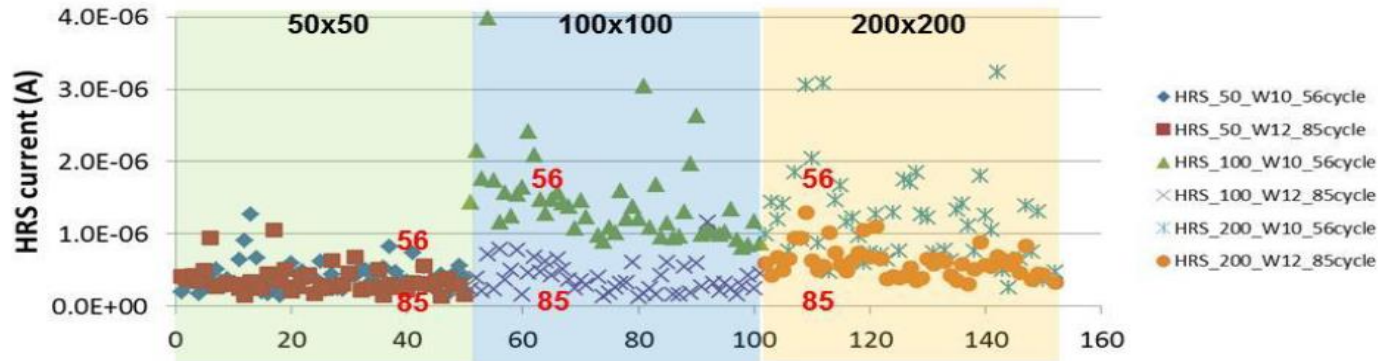
Key Learning:

- V_f decreases with thicker OEL
- Device with thin OEL shows unstable switching, large distribution in V_{set}, HRS current and LRS current

Needs for RRAM optimization for Variability

Improvement: **Effect of HfO₂ Thickness and Cell Area**

HRS Current vs. HfO₂ thickness (56 cycles vs. 85 cycles,
Set CC = 75uA



Key Learning:

- V_f increases with HfO₂ thickness, decreases with device area
- HRS current shows larger spread with thinner HfO₂

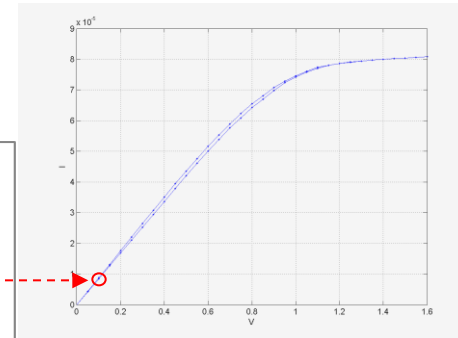
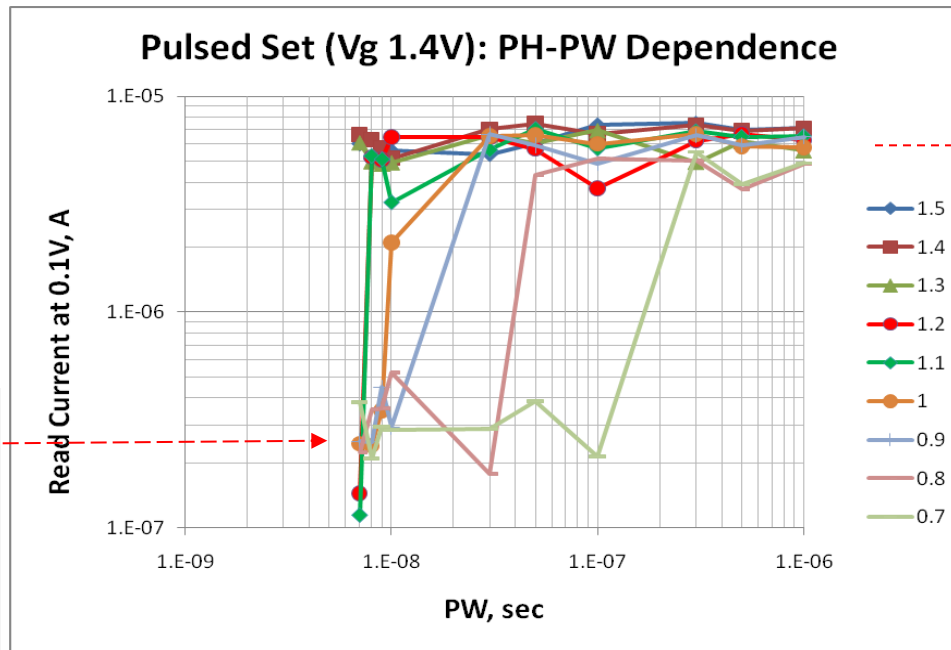
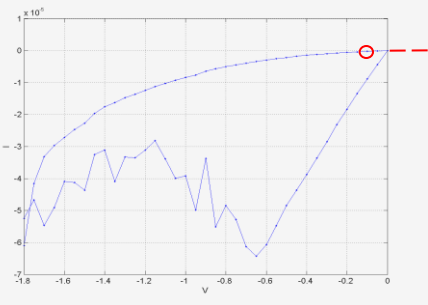
Smaller cell area shows lower variability

Achieving discrete resistive states via **PW-PH** in pulsed Set

Pulsed Set: PW-PH Dependence

$V_g = 1.4V$
 $I_{compl} = 78 \mu A$
 $R_{LRS} \sim 16 k \Omega$
 $R_{HRS} \sim 500 k \Omega$

Starting State: HRS
(after DC Reset)



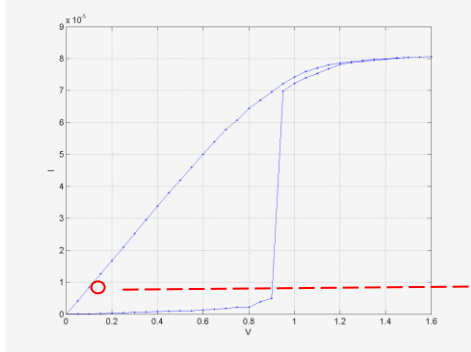
After Pulse: Full Set
Device in LRS State

- Clear trend: faster switching at higher pulsed voltage

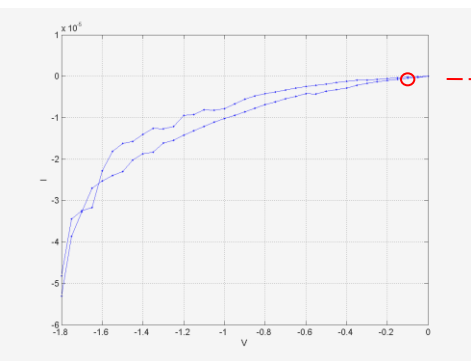
Achieving discrete resistive states via **PW-PH** in pulsed Set

Pulsed Reset: PW-PH Dependence

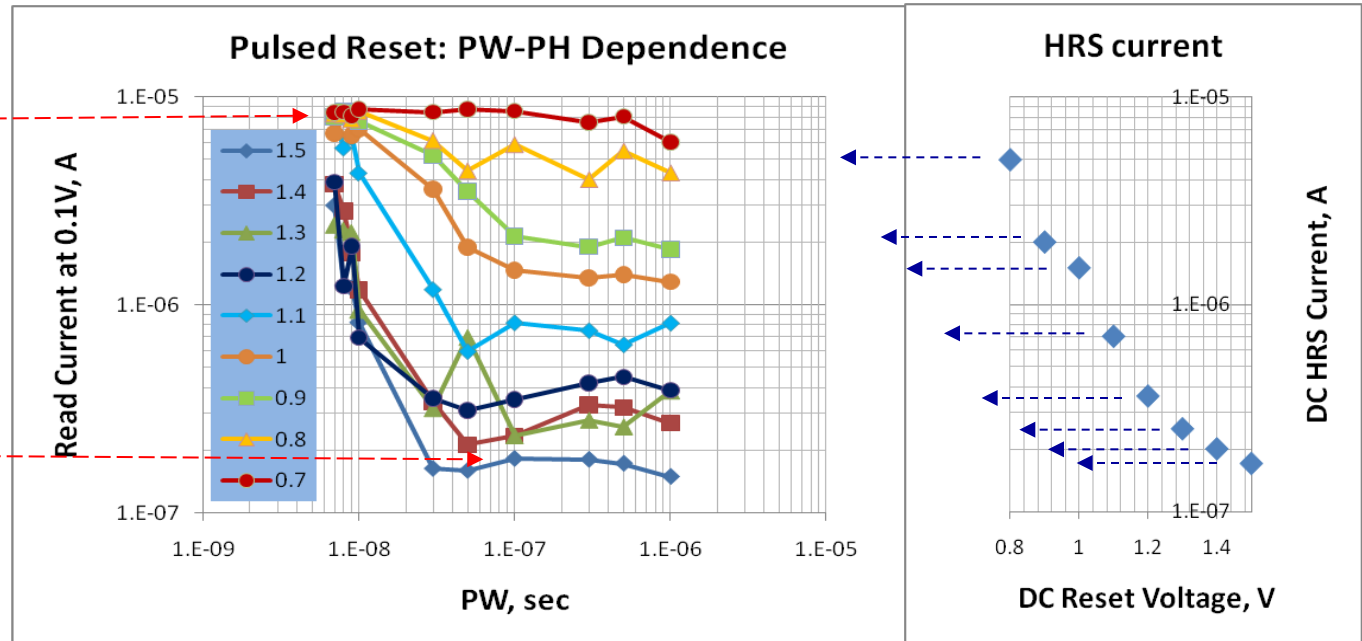
$V_g = 1.4V$
 $I_{compl} = 78 \mu A$
 $R_{LRS} \sim 16 k \Omega$
 $R_{HRS} \sim 500 k \Omega$



Starting State: LRS
(after DC Set)

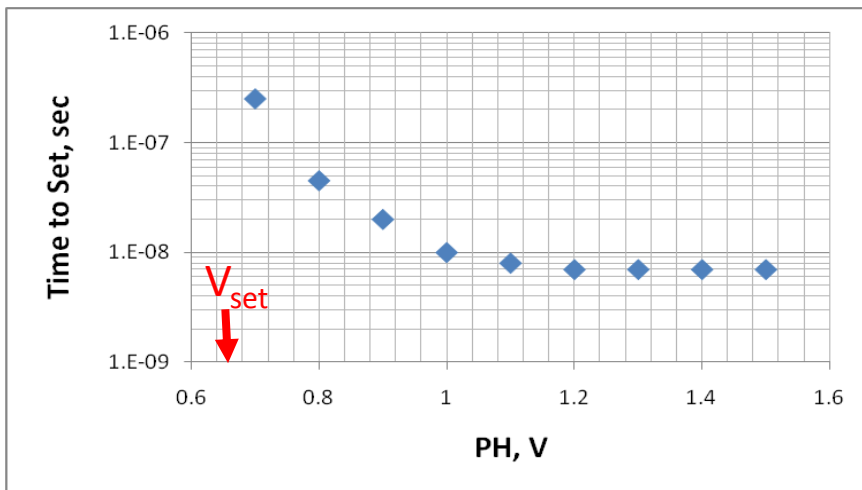


After Pulse:
Device in HRS State

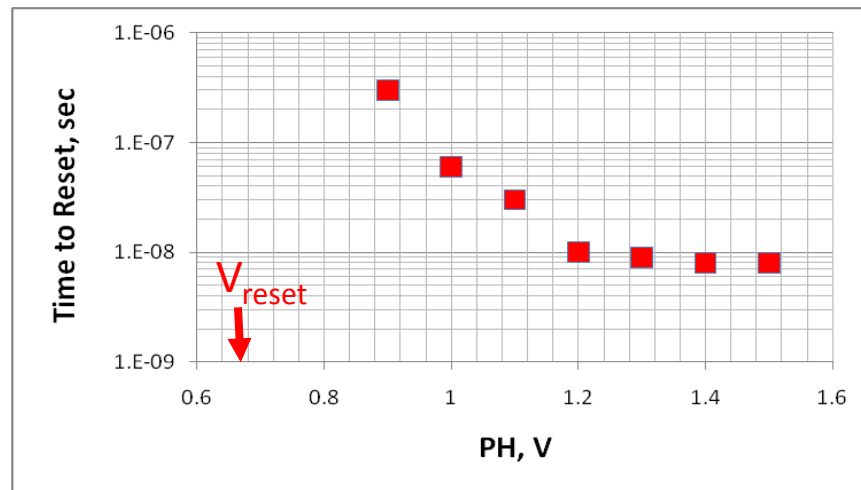


Pulsed Set/Reset: PW-PH Tradeoff

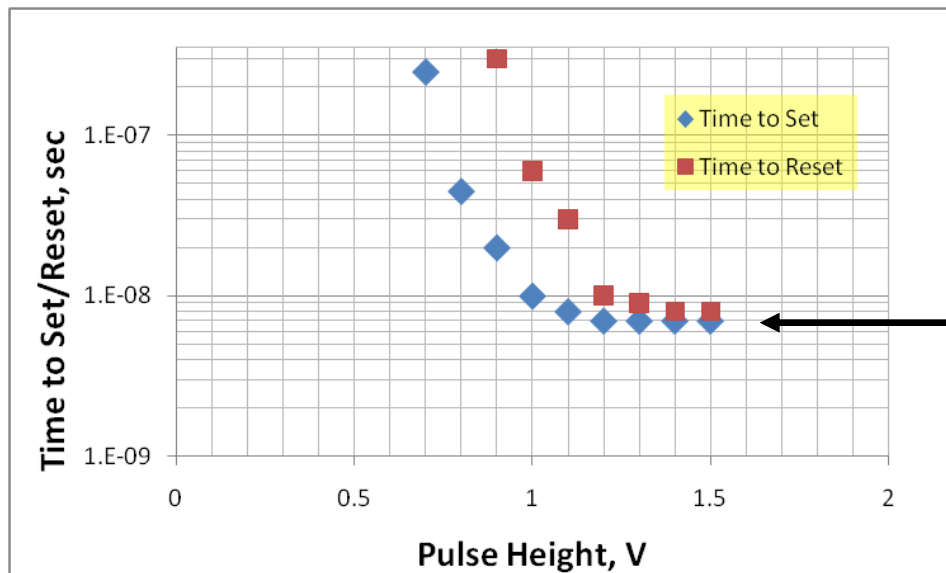
Pulsed Set



Pulsed Reset



$V_g = 1.4V$
 $I_{compl} = 78 \mu A$
 $R_{LRS} \sim 16 k \Omega$
 $R_{HRS} \sim 500 k \Omega$



Limited by Pulse Gen resolution:
 PW ~ 6 ns at
 Rise/Fall 2 ns

Pulsed Set/Reset: PW-PH Tradeoff (D. Ielmini)

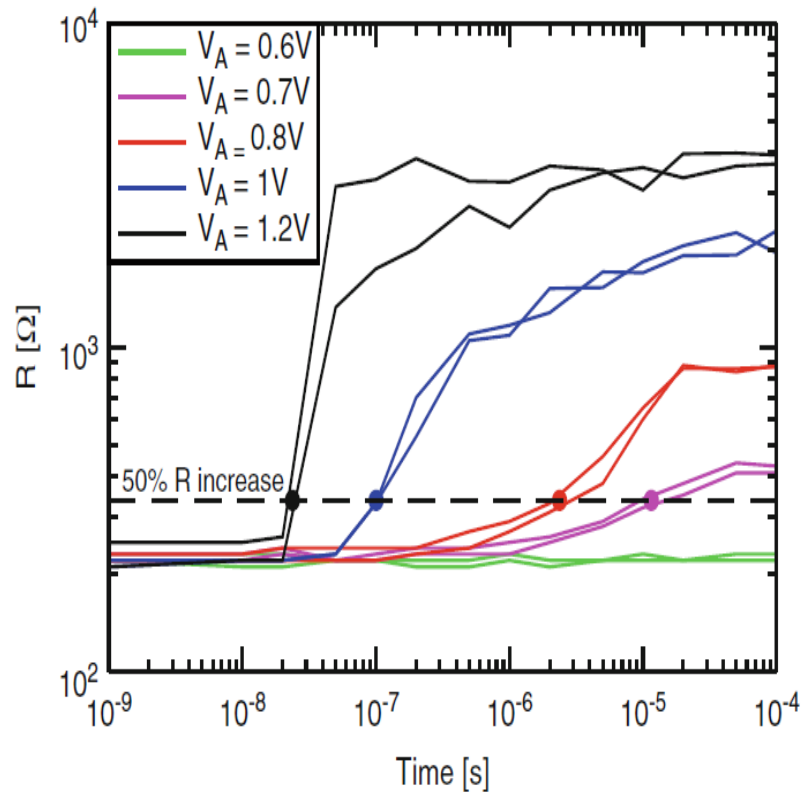


Fig. 6.8 Measured R as a function of time during reset for increasing V_A . No load resistance was applied in series with the cell. The reset time, corresponding to a 50% increase of R , is marked on the figure, indicating an almost exponential decrease of t_{reset} for increasing voltage

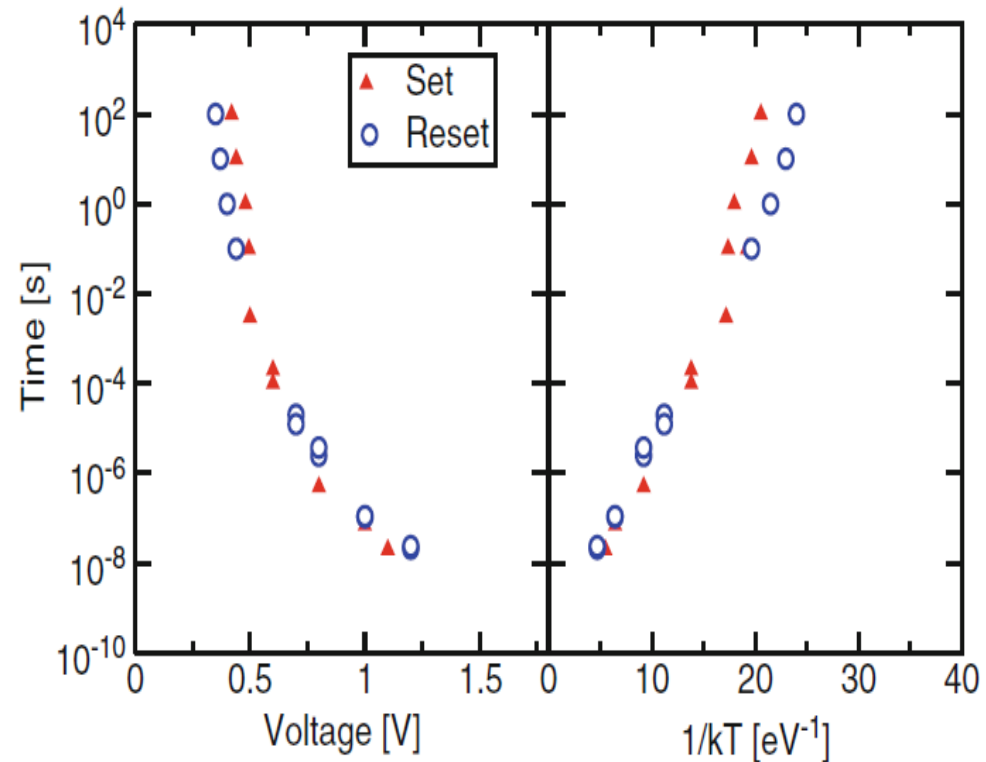
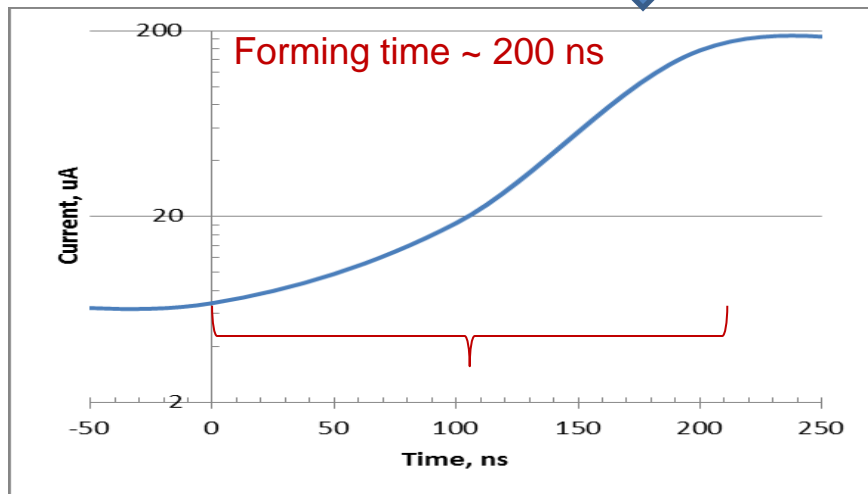
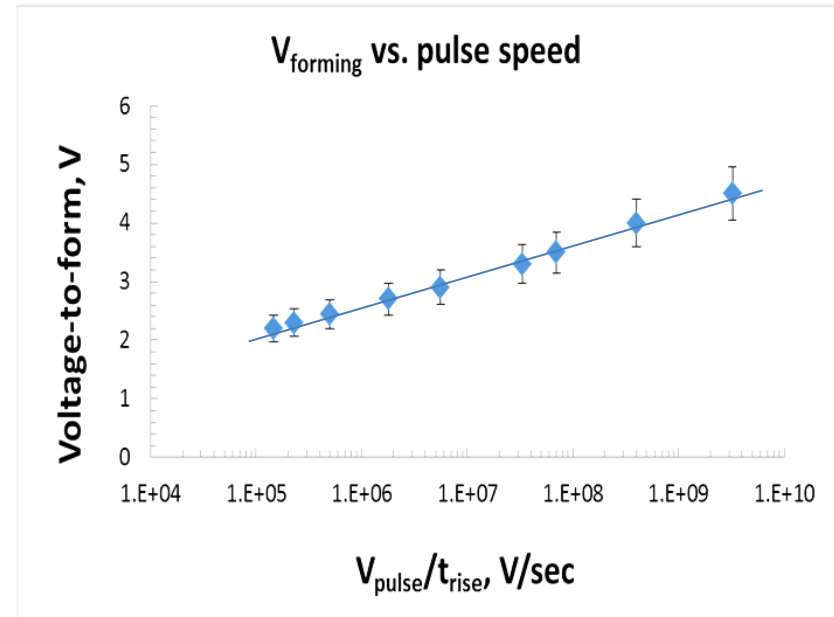
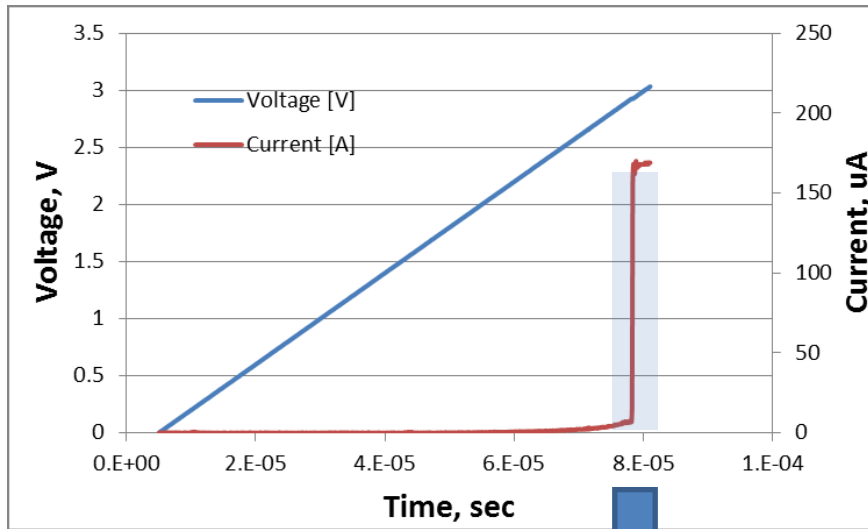


Fig. 6.9 Measured set and reset times, evaluated as a 50% resistance decrease or increase, respectively, as a function of voltage (a) and as a function of $1/kT$ (b), where T is the local temperature at the CF evaluated from the Joule heating formula of Eq. (6.4). The exponential dependence on $1/kT$ suggests that set/reset processes are due to temperature-activated mechanisms obeying an Arrhenius law

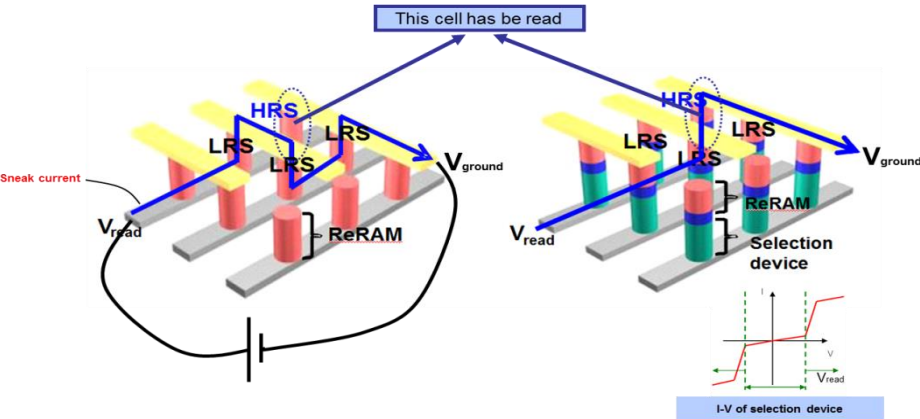
Pulsed Forming: V_F – Pulse speed trade-off



Forming Voltage *increases* with Increasing pulse speed, $V_{\text{pulse}}/t_{\text{rise}}$

Необходимость создания самосовмещенного селектора

Background : Necessity of selection device in cross point array

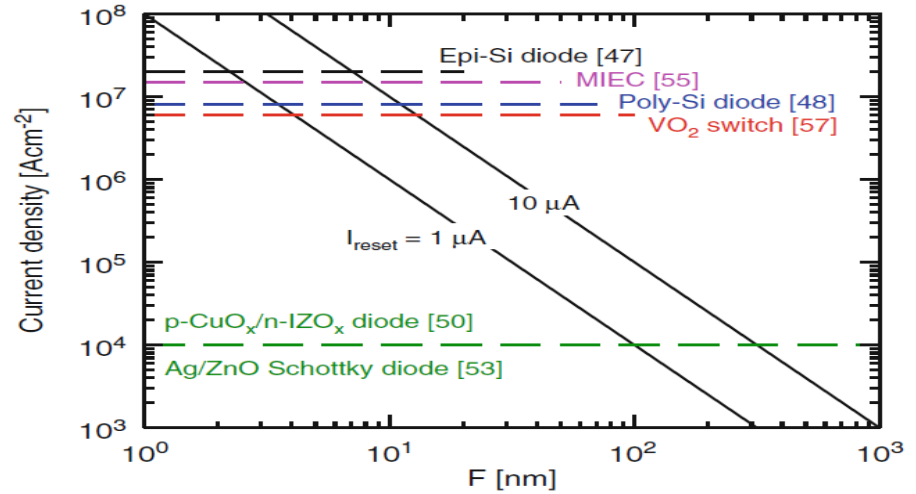


During the reading, unwanted sneak current prevents sensing

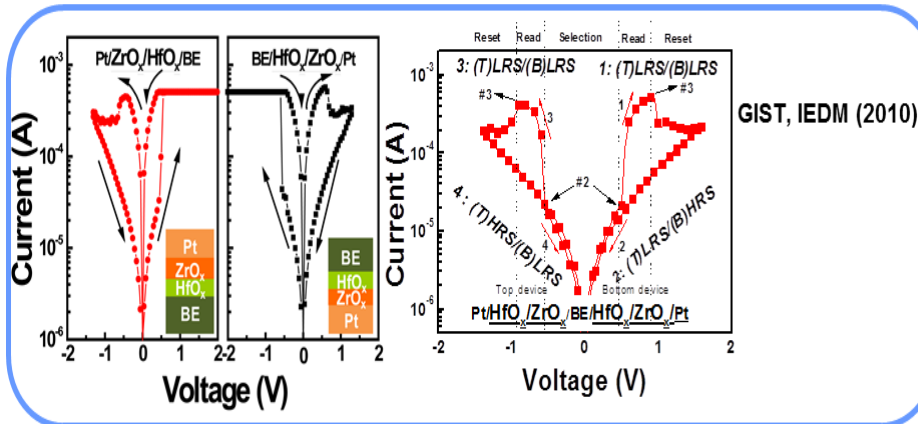
→ LRS cells nearby HRS cell prevent reading current from passing through HRS cell which has be read

If all cells are connected with selection device having rectifying characteristics

→ Sneak current passing through LRS cell nearby HRS is blocked by reversed biased selection device

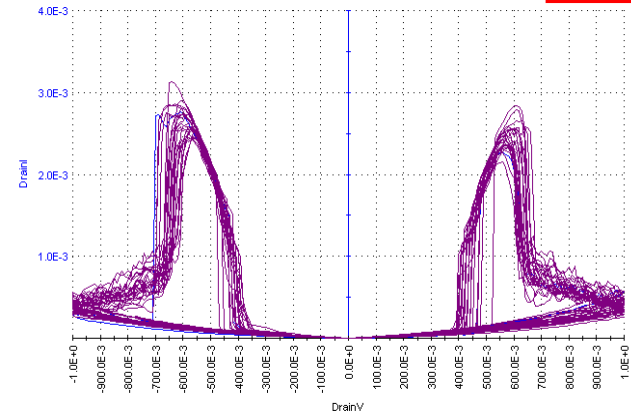


- Плотность тока растет с уменьшением размера ячейки
- Селектор должен удовлетворять требованиям по плотности тока



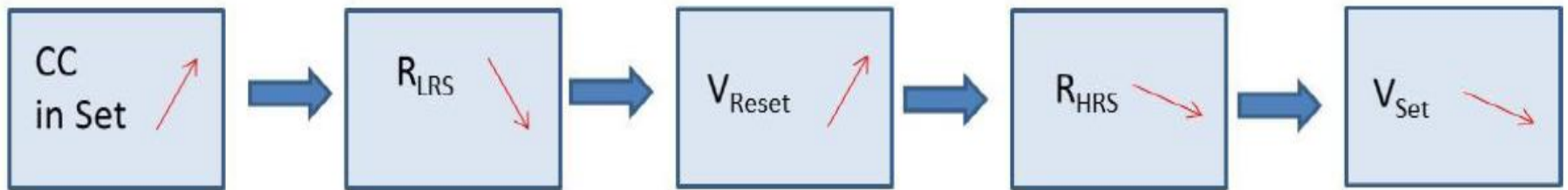
04/07/2011 20:26:29

KEITHLEY



$R_{HRS} - R_{LRS} - V_t$ Взаимозависимость

CC in Set at V_{reset} Range = Const

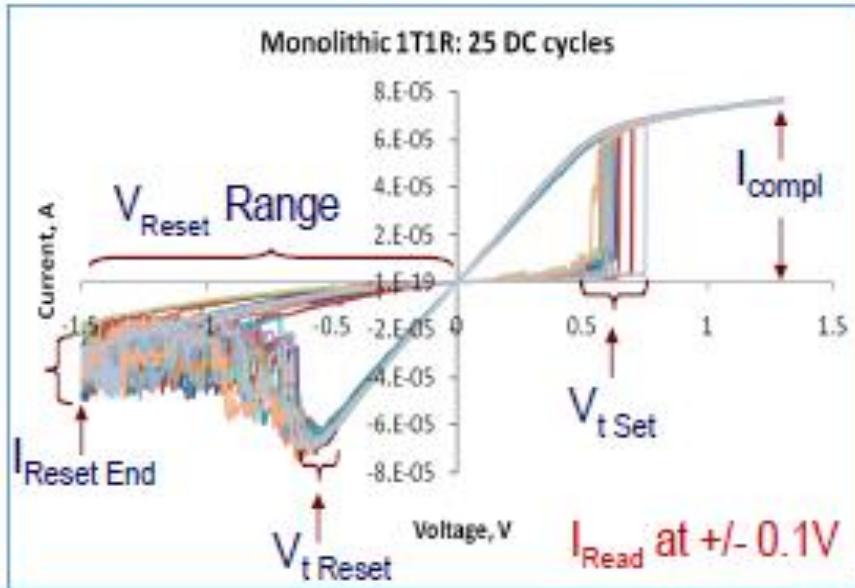


V_{reset} Range at CC = Const



Необходимость улучшения воспроизводимости характеристик переключения

DC Switching: Intrinsic Variability



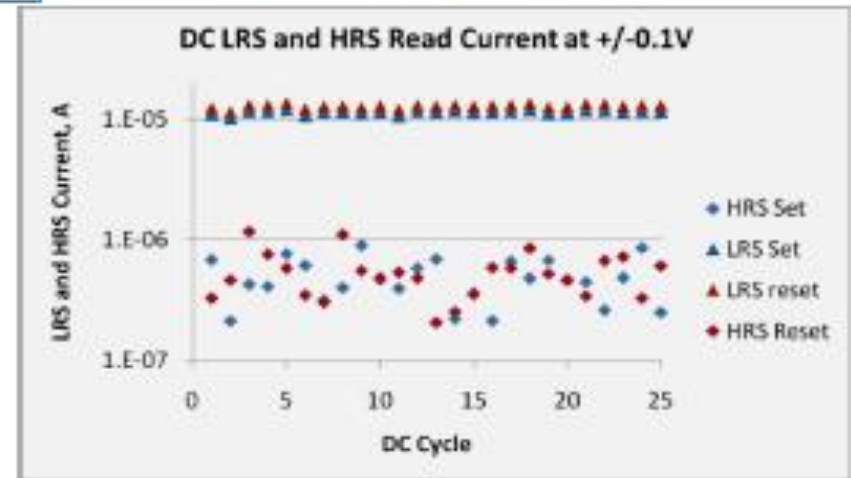
Approach:

- Run multiple DC Cycles (25-100 cycles)
- Determine Mean and St Dev
- Use **same device** to repeat DC cycles at
 - different I_{compl}
 - different V_{Reset} Range

HRS and LRS Currents

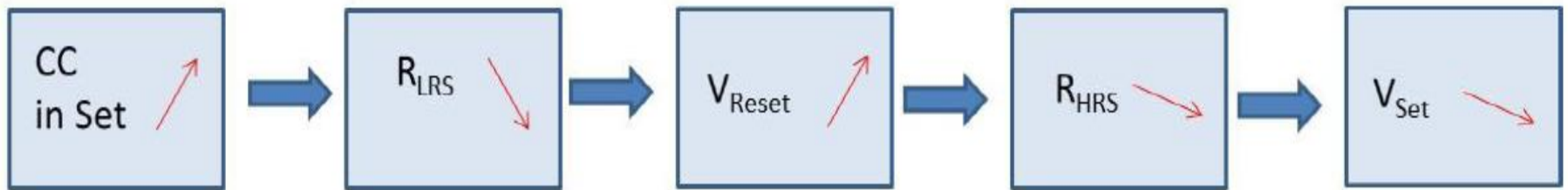
Key Learning:

- HRS Current – highest variability
- Sigma/Mean ratio >30%



$R_{HRS} - R_{LRS} - V_t$ Interdependencies and Tunability

CC in Set at V_{reset} Range = Const



Vreset Range at CC = Const



